



DOCUP 2002-2007
Cadre d'intervention C5-03

Projet de recherche :
Les mouvements de terrain de grande ampleur
dans les cirques et les grandes ravines de La Réunion

Module 3 : Suivi des mouvements
Sous module 3.1 : Les glissements de grande ampleur
Programme 2002

Suivi des glissements de Hell-Bourg et de Grand Ilet par les stations GPS permanentes

Rapport final

BRGM/RP-56708-FR

Octobre 2008















Suivi des glissements de Hell-Bourg et de Grand Ilet par les stations GPS permanentes

Rapport final

BRGM/RP-56708-FR

Octobre 2008

Étude réalisée dans le cadre du projet de recherche
BRGM RISR15

A. Bellanger, B. Aunay

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : C. Garnier	Nom : JL. Nédellec
Date :	Date :
Signature :	Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.











Mots clés : mouvement de terrain, suivi, GPS, glissement, Salazie, traitement du signal, Tempo, analyse fonctionnelle, Ile de La réunion

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Bellanger A. , Aunay B. (2008) - Suivi des glissements de Hell-Bourg et de Grand Ilet par les stations GPS permanentes – Rapport RP-56708-FR – 62 p. , 58 illustrations

Synthèse

Dans le cadre d'intervention C5.03 du DOCUP (soutenir la recherche et le développement sur les phénomènes de risques naturels), le BRGM s'est engagé à la réalisation d'un programme de recherche sur les mouvements de terrain de grande ampleur dans les cirques et les grandes ravines à La Réunion (programme MVTerre).

Le présent rapport s'inscrit dans le sous-module 3.1 du programme qui prévoit l'étude des glissements de terrain actifs de grande ampleur.

Deux sites pilotes ont été retenus pour cette étude : le glissement de Grand Ilet et le glissement de Hell-Bourg, tous deux situés dans le cirque de Salazie.

Fin 2003, ces deux sites ont chacun été instrumentés à l'aide d'une station GPS permanente qui acquiert un positionnement deux fois par jour ainsi que d'une station pluviométrique dont la pluviométrie est relevée quotidiennement par Météo France.

Ce suivi a permis d'appréhender les évolutions spatiales ainsi que les vitesses de déplacement des deux glissements de terrain. Les déplacements enregistrés par les GPS fixes sont conformes, en valeur comme en orientation des mouvements, aux données issues du réseau géodésique.

L'acquisition des données GPS a cependant souffert de divers problèmes techniques comme des pannes de longue durée (notamment pendant le passage du cyclone Gamède sur l'île) ou encore un bruit de fond (dispersion des points de positionnement) masquant le déplacement réel de la masse en mouvement (notamment pour le glissement de Grand Ilet).

L'analyse combinée de la pluviométrie et des déplacements a montré qu'il existe une relation directe pluies/déplacements, qui s'explique probablement par un phénomène de mise en pression de la(des) surface(s) de cisaillement par les eaux d'infiltration rejoignant le corps des glissements.

La persistance d'un déplacement minimum en période sèche alors que les sources sont à l'étiage, montre que les masses instables ont une capacité à glisser purement gravitairement. La résistance au cisaillement résiduelle des surfaces de glissement, acquise en grands déplacements, ne suffit plus à contenir la masse glissée. La pluviométrie joue donc le rôle d'accélérateur des mouvements, et n'a donc pas un effet déclencheur.

La réactivité rapide du système pluies/déplacements tend à démontrer que la part d'infiltration vers les plans de glissement est très importante. Elle pourrait ainsi s'expliquer par le fait que ces infiltrations se font prioritairement, et de façon assez directe, par le biais d'un réseau de fissures émergeant en surface et sont entretenues, dans un second temps, par les infiltrations directes à travers le matériel brèchique constituant les corps des deux glissements de terrain. Ce schéma permettrait d'expliquer le faible temps de réaction du glissement après le pic pluvieux et le fait que les mouvements ne s'amortissent que lentement après la fin des pluies.

L'analyse combinée de la pluviométrie et des déplacements réalisée à partir du logiciel Tempo développé en interne par le BRGM, tend à mettre en lumière le fait que la relation directe entre ces deux paramètres est linéaire. Les simulations indiquent notamment :

- que les déplacements sont directement proportionnels à la quantité d'eau tombée au cours de la saison humide (et donc en mesure de s'infiltrer dans la zone en mouvement) ;

- que l'occurrence de saisons cycloniques très arrosées ne génère pas « d'emballement » du glissement, ce qui laisse supposer que les matériaux glissés conservent une certaine résistance au cisaillement ;

- qu'il est nécessaire de dépasser un cumul pluviométrique sur la saison pour que les mouvements connaissent une accélération significative.

Cette étude a permis de progresser significativement dans la connaissance du fonctionnement du glissement, et notamment sur la relation pluies/déplacements. Ces enseignements doivent cependant être pris avec beaucoup de précaution, dans la mesure où la plage d'enregistrement pluies/déplacements est relativement limitée et le nombre d'épisodes pluvieux exceptionnels exploitables peut être jugé insuffisant. Ces avancées dans la connaissance sur la relation pluies/déplacements devront par conséquent être confortées par la poursuite du travail d'acquisition et d'interprétation.

Sommaire

Liste des illustrations

1. Introduction

Dans le cadre d'intervention C5.03 du DOCUP (soutenir la recherche et le développement sur les phénomènes de risques naturels), le BRGM s'est engagé à la réalisation d'un programme de recherche sur les mouvements de terrain de grande ampleur dans les cirques et les grandes ravines à La Réunion (programme MVTerre).

Le sous-module 3.1 du programme prévoit l'étude des glissements de terrain actifs de grande ampleur.

Deux sites pilotes ont été retenus pour étudier le comportement de ces mouvements de terrain : il s'agit du glissement de terrain de Hell-Bourg et celui de Grand Ilet, dans le cirque de Salazie (Illustration 1). Le choix de ces sites a été motivé :

- par la présence d'enjeux importants puisque les deux zones sont habitées ;
- en raison des dimensions et de l'activité très importante de ces mouvements de terrain ;
- par le fait que le BRGM dispose de données sur chaque site.

Ces mouvements ont effectivement été suivis partiellement depuis 1995 pour le glissement de Hell-Bourg et depuis 1998 pour le glissement de Grand Ilet, et ce, jusqu'en 2002. Le suivi qui concernait respectivement la R.D. 48 et la R.D. 52 a été initié par la Direction des Routes du Département de La Réunion en partenariat avec le BRGM Réunion. Ce suivi était pratiqué par des séries trimestrielles de levés topographiques de bornes géodésiques réparties le long des routes départementales. Les mesures de positionnement de ces bornes géodésiques avaient permis d'appréhender de façon préliminaire la dynamique des glissements au droit du tracé des routes départementales.

Dans le cadre du projet MVTerre, des équipements ont été mis en place pour suivre de façon beaucoup plus fine l'évolution des glissements dans le temps. En effet, chaque site pilote a été équipé de bornes géodésiques supplémentaires, d'une station GPS permanente et d'une station pluviométrique.

Ce présent rapport présente donc le dispositif de suivi des mesures, synthétise les différentes données issues des GPS et expose les résultats issus d'une analyse combinée de la pluviométrie et des déplacements.

2. Présentation du dispositif de suivi

2.1. LOCALISATION DES GLISSEMENTS DE TERRAIN

Les deux sites pilotes sont localisés dans le cirque de Salazie : le glissement de Grand Ilet au Nord-Ouest et le glissement de Hell-Bourg au Sud-Est du cirque (Illustration 1).

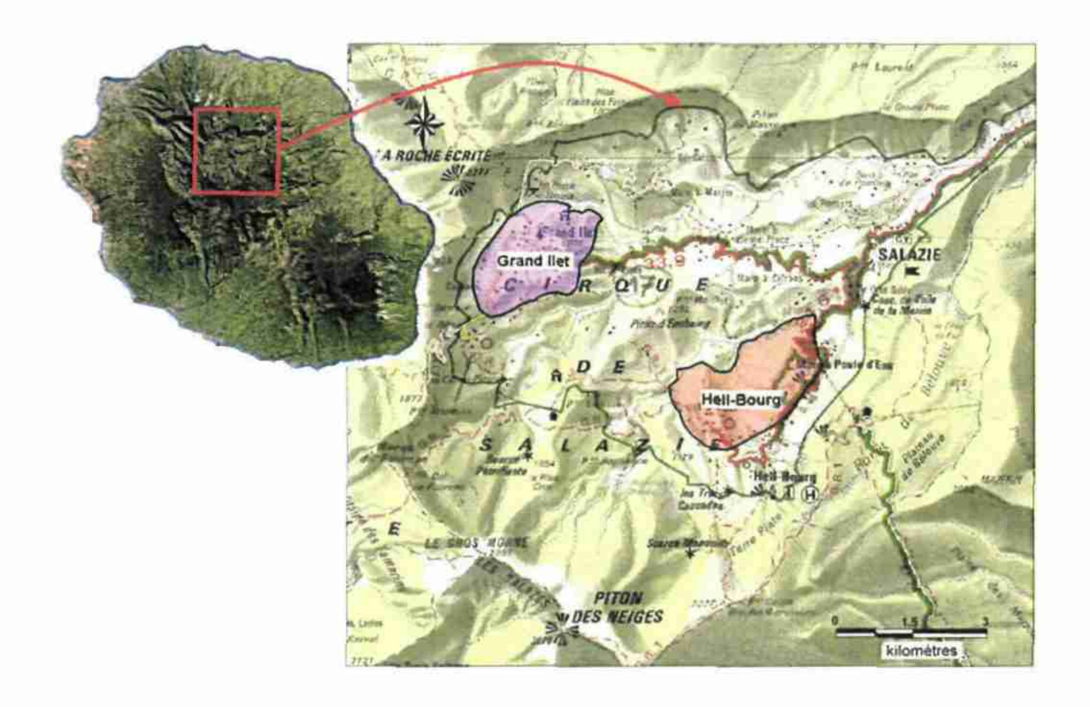


Illustration 1 : Localisation des sites pilotes

Antérieurement, les volumes en mouvement ont été estimés approximativement à 4 km² pour le glissement de Grand Ilet et à 4,7 km² pour le glissement de Hell-Bourg.

Dans le cadre du sous module 2.2 du projet de recherche MVTerre, des campagnes de mesure de positionnement géodésiques ont été réalisées dans le massif du Piton des Neiges (et notamment dans le cirque de Salazie) afin de détecter et de suivre les mouvements de grand ampleur avant et après les saisons cycloniques.

Le suivi de ces bornes au niveau des sites pilotes a permis d'appréhender globalement les différentes vitesses d'avancement au sein des glissements :

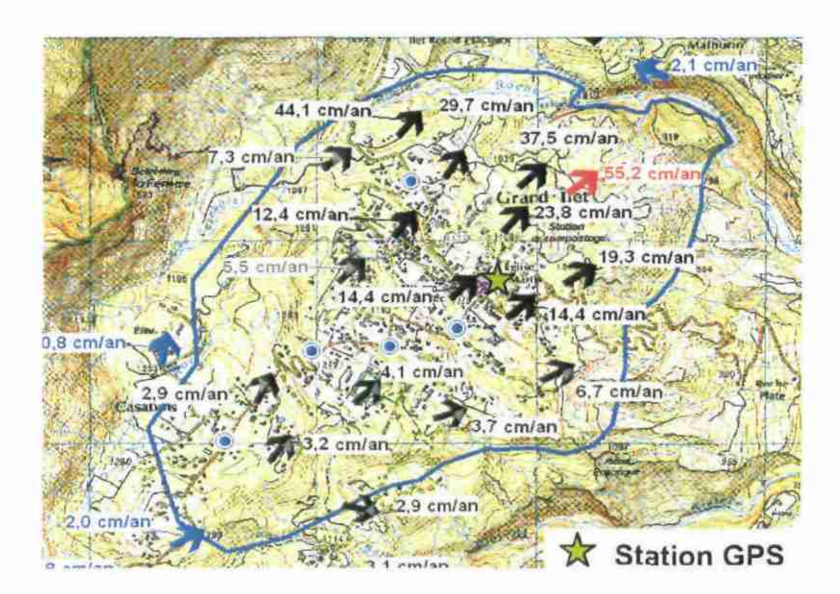


Illustration 2 : Grand Ilet : vitesses d'avancement horizontal moyennes du glissement (2003-2007)

Pour le secteur de Grand Ilet, les levés géodésiques montrent l'existence d'un mouvement vers le nord-est. Les vitesses de déplacement, variant de quelques cm/an à plus de 50 cm/an, sont décroissantes vers le sud-ouest. Le suivi journalier des données issues d'une station GPS permanente au sein de ce glissement permet ainsi d'affiner les connaissances sur ce glissement.

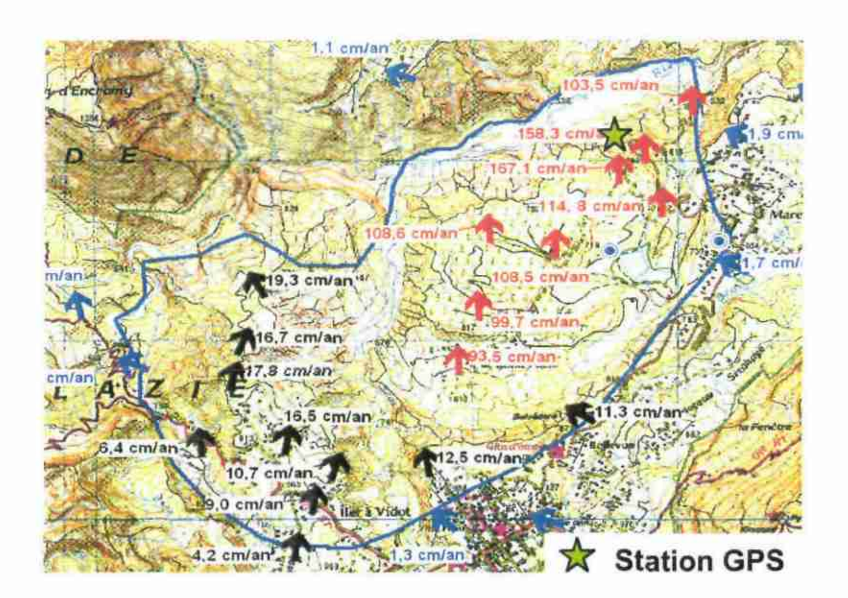


Illustration 3 : Hell-Bourg : vitesses d'avancement horizontal moyennes du glissement (2003-2007)

Pour le secteur de Hell-Bourg, les levés géodésiques montrent l'existence d'un mouvement vers le nord. Les vitesses de déplacement, variant de quelques cm/an à plus de 150 cm/an, sont les plus élevées au niveau du site de Mare à Poule d'eau. Comme pour Grand Ilet, le suivi journalier des données issues d'une station GPS permanente au sein de ce glissement permet d'affiner les connaissances sur ce glissement.

2.2. DESCRIPTIF DES EQUIPEMENTS UTILISES

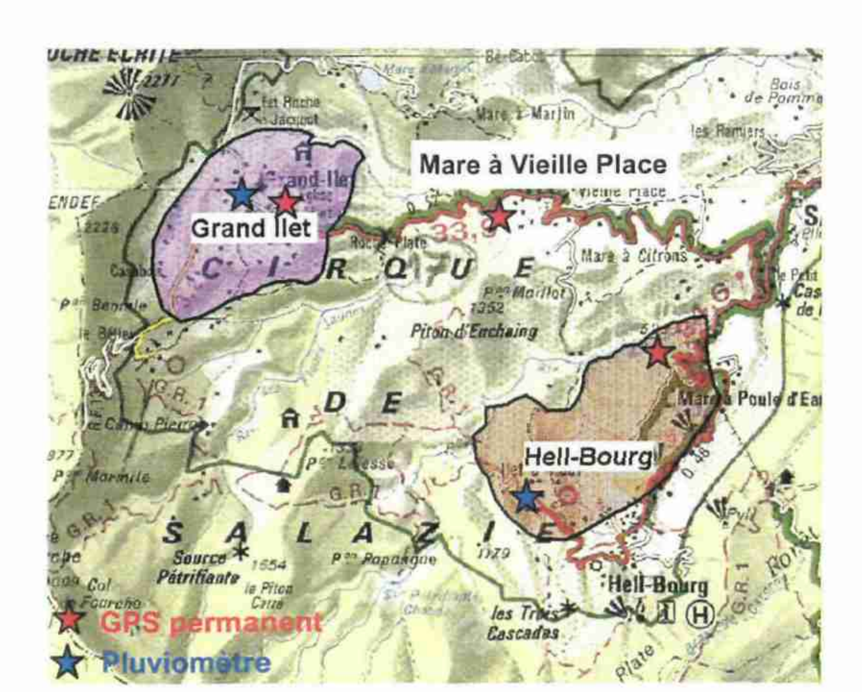


Illustration 4 : Instrumentation des sites

Le 30 Décembre 2003, des stations GPS permanentes ont été mises en place dans les deux zones en mouvement ainsi qu'au niveau du pivot central choisi sur le site de Mare à Vieille Place. Le matériel provient du fournisseur LEICA France ; le modèle choisi est LEICA SR 520, Terminal TR 500, Antenne AT 503 :

- la station GPS permanente du glissement de Grand Ilet a été positionnée dans la partie *centrale du plateau en mouvement, dans un secteur où les vitesses d'avancement sont* moyennes (Illustration 2). Précisemment, cette station GPS a été positionnée au niveau du local communal utilisé pour le catéchisme, près de l'Eglise de Grand Ilet. L'antenne est fixée sur le toit du bâtiment et le boîtier d'acquisition se trouve à l'intérieur ;

- la station GPS permanente du glissement de Hell-Bourg a été positionnée au nord de l'emprise du glissement, dans un secteur connu comme très actif (Illustration 3). Précisemment, cette station GPS a été postionnée sur la propriété de M. Viraye, le long de la RD 48 au niveau du PK 20,5. L'antenne est fixée sur le toit du container et le boîtier d'acquisition se trouve à l'intérieur de celui-ci ;

- la station GPS permanente utilisée comme pivot central a été positionnée au niveau de l'ancien réservoir d'eau à Mare à Vieille Place, avant la descente Carozin, au niveau du PK 7,6 de la RD 52. L'antenne et le boîtier d'acquisition sont fixés sur le mur du réservoir (Illustration 5). Cette station GPS a une position centrale par rapport à Grand Ilet et à Hell-Bourg ; son éloignement est de l'ordre de 3 km à vol d'oiseau par rapport aux 2 autres stations.

Les capteurs d'acquisition sont alimentés par des batteries 12V se trouvant dans les boîtiers mais d'ici la fin du projet MVTerre 1 (dernier trimestre 2008), ils seront branchés sur secteur.

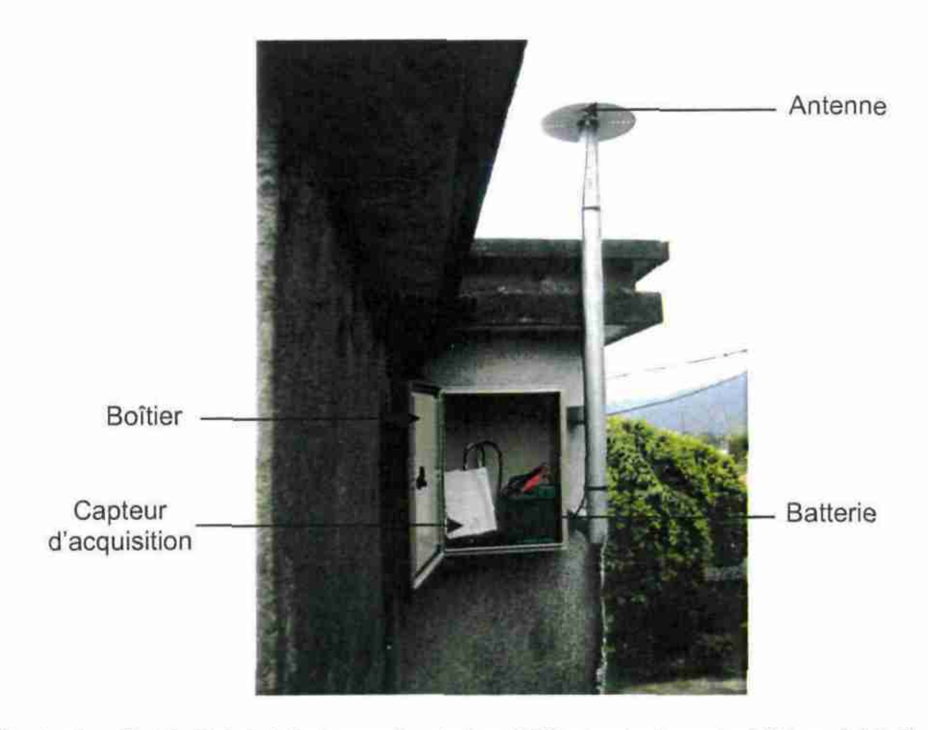


Illustration 5 : Matériel utilisé pour la station GPS du pivot central (Mare à Vieille Place)

Deux pluviométres ont également été installés pour les besoins du projet MVTerre (Illustration 4) :

- pour le glissement de Hell-Bourg, un pluviométre a été installé sur le site d'Ilet à Vidot, à côté du bâtiment du C.A.S.E., au niveau du PK 27,9 de la RD 48 ;

- pour le glissement de Grand Ilet, un pluviométre a été installé sur le site de Grand Ilet, au bout du chemin Citerne situé au niveau du PK 15,5 de la RD 52 à côté du réservoir.

Les pluviométres sont équipés d'une unité d'acquisition et de traitement ainsi que d'une d'alimentation solaire. L'ensemble du matériel est protégé par un enclos grillagé (Illustration 6). *Ces pluviométres sont gérés par Météo France par voie de convention.*





Illustration 6 : Matériel utilisé pour la station pluviométrique d'Ilet à Vidot

2.3. ACQUISITION DES DONNEES

Depuis l'instrumentation des sites fin 2003, la pluviométrie est relevée quotidiennement par Météo France et les données GPS sont collectées par le BRGM tous les mois lors d'un déplacement sur site. A cette occasion, concernant les GPS :

- de nouvelles sessions d'enregistrement sont créées grâce à un panneau de configuration mobile se fixant sur le capteur (Illustration 7) ;

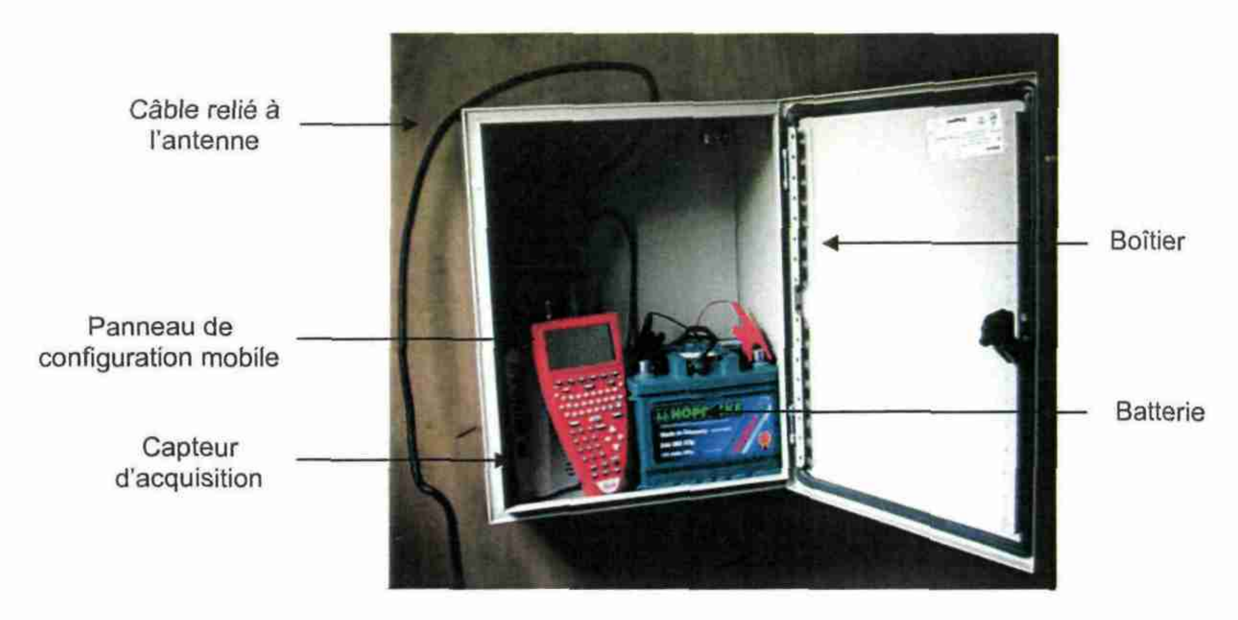


Illustration 7 : Matériel utilisé pour l'acquisition des données

- la batterie est changée ;
- la configuration des GPS est modifiée si besoin.

Les stations GPS sont configurées pour acquérir un positionnement 2 fois par jour ; toutes les 12h. Ils réceptionnent des signaux GPS pendant 2 sessions de 30 minutes chacune (à partir respectivement de 11h et 23h, heure locale). La mesure GPS issue d'une session est donc une moyenne des signaux reçus pendant les 30 minutes d'acquisition.

3. Données issues des stations GPS

3.1. DIFFICULTES RENCONTREES

Le traitement des données brutes, initialement effectué avec le logiciel Skipro fourni avec le matériel GPS du fournisseur LEICA France, est désormais réalisé à l'aide du logiciel Leica Géo Office. Il permet d'obtenir les coordonnées cartésiennes X, Y, Z des différentes stations GPS en fonction du temps dans le système de coordonnées RGR92.

Le référentiel a été choisi de telle sorte que l'axe X soit parallèle à la droite d'orientation Ouest-Est et que l'axe Y soit parallèle à la droite d'orientation Nord-Sud.

L'acquisition GPS n'est pas parfaite puisqu'il existe des lacunes dans les données, de 12h à plusieurs semaines (Illustration 8), sans que LEICA France n'ait réussi à résoudre ces anomalies. Les conditions extérieures pourraient être à l'origine de ces disfonctionnements (chaleur, humidité etc).

De plus, la qualité et la précision du matériel d'acquisition GPS sont telles qu'il existe une dispersion des points de positionnement qui peut être caractérisée de « bruit de fond » (Illustration 8).

Enfin, des pannes de matériel de plusieurs mois ont été à déplorer (Illustration 8) et notamment durant le passage du cyclone Gamède sur l'île.

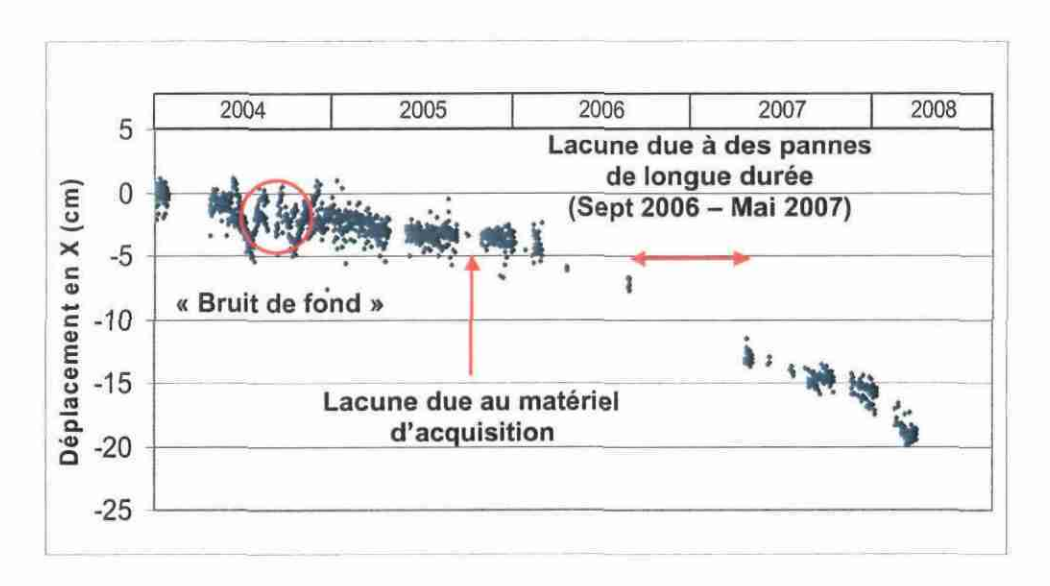


Illustration 8 : Difficultés rencontrées pour l'acquisition des données (exemple du glissement de Hell-Bourg : déplacement planimétrique en X)

3.2. DONNEES GPS

Après le traitement grâce au logiciel Leica Géo Office, les données sont importées dans une feuille Excel où il est alors possible de tracer :

- les courbes de déplacement planimétrique en X (Est) et en Y (Nord) ;
- la courbe de tassement ;
- la courbe en XY caractérisant l'orientation du mouvement.

Le site de Mare à Vieille Place est une zone connue pour être stable ; c'est pourquoi la station GPS de Mare à Vieille Place est utilisée comme pivot central (point de référence). Toutefois, d'après les bornes MVTerre, sa vitesse de déplacement moyenne est estimée à *environ 1,7 cm/an (valeur néanmoins négligeable au regard des grands secteurs en* mouvement). Il est probable que cette valeur de plus de 1 cm/an soit liée en réalité à un artéfact issu d'un changement de référence GPS, au cours du projet, par le géomètre topographe en charge des mesures.

3.2.1. Glissement de Grand Ilet

a) *Déplacement planimétrique en X*

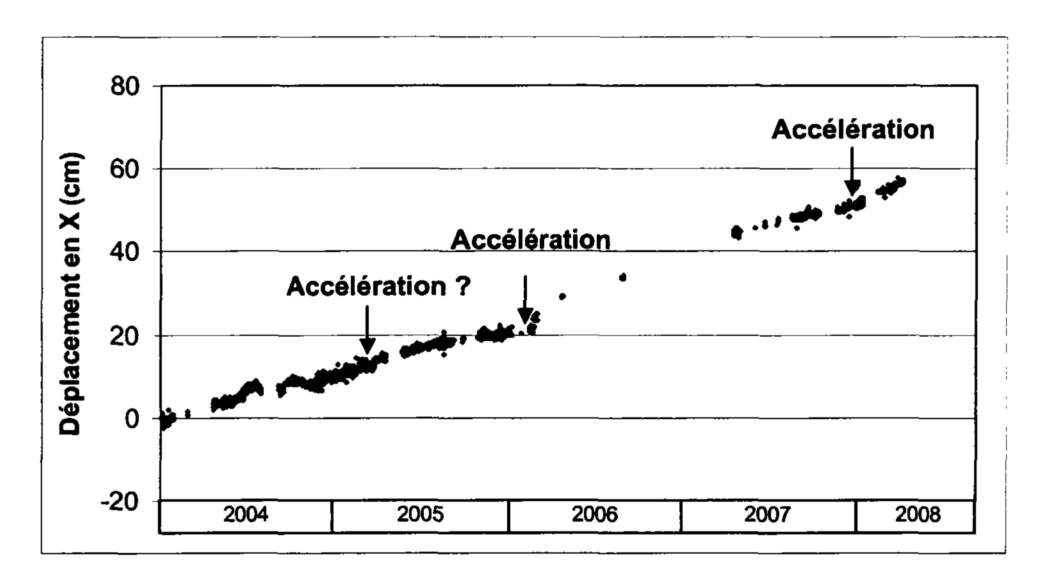


Illustration 9 : Grand Ilet : déplacement planimétrique en X (Est)

Pour la période d'observation allant du 30 Décembre 2003 au 6 Mai 2008, le déplacement planimétrique total mesuré vers l'Est est de l'ordre de 56,5 cm soit une vitesse de déplacement moyenne associée de l'ordre de 13,0 cm/an.

La vitesse de déplacement planimétrique vers l'Est est relativement constante jusqu'à l'année 2005 puis une accélération brutale du mouvement s'est produite en début d'année 2006 ainsi qu'une autre phase d'accélération à la fin de l'année 2007. Il est difficile d'affirmer que la très légère modification de pente au cours de l'année 2005 corresponde à une accélération réelle du mouvement.

Globalement, la dispersion des points de positionnement est telle que les différentes phases du mouvement sont difficilement appréciables : seules deux accélérations nettes ont pu être identifiées.

b) Déplacement planimétrique en Y

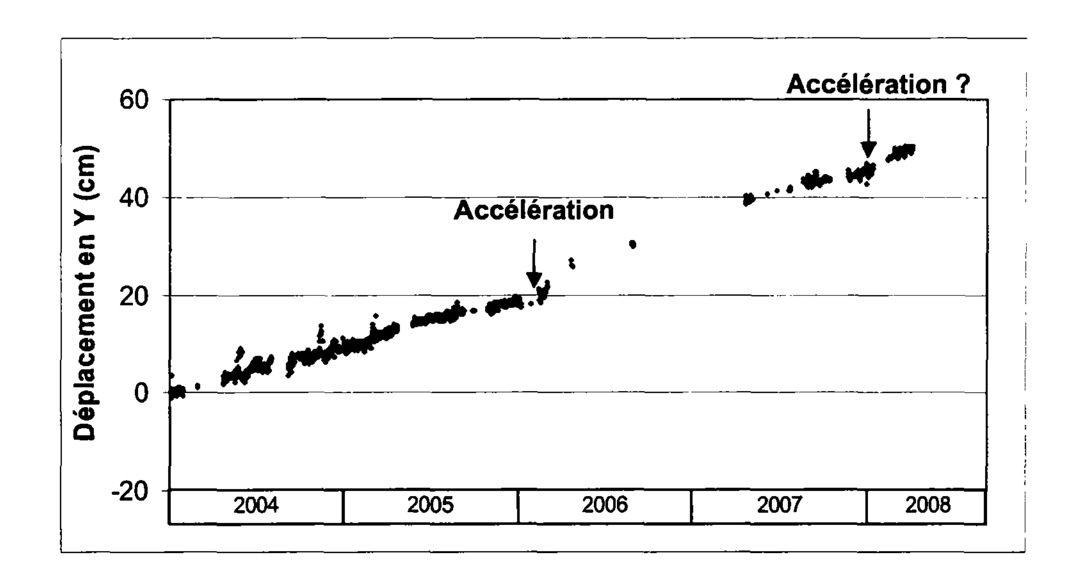


Illustration 10 : Grand Ilet : déplacement planimétrique en Y (Nord)

Pour la période d'observation allant du 30 Décembre 2003 au 6 Mai 2008, le déplacement planimétrique total mesuré vers le Nord est de l'ordre de 50,2 cm soit une vitesse de déplacement moyenne associée de l'ordre de 11,5 cm/an.

La vitesse de déplacement planimétrique vers le Nord est relativement constante jusqu'à l'année 2005 puis une accélération brutale du mouvement s'est produite au cours de l'année 2006. Il est possible également de deviner, en corrélant les résultats obtenus avec le déplacement planimétrique vers l'Est, une autre phase d'accélération à la fin de l'année 2007, celle-ci reste toutefois moins significative.

Comme pour le déplacement en X, la dispersion des points de positionnement est telle que les différentes phases du mouvement sont difficilement appréciables, excepté l'accélération nette de l'année 2006.

Le déplacement et la vitesse de déplacement de la résultante planimétrique R peuvent ensuite être calculés à l'aide des deux composantes en X et en Y : $R = \sqrt{(X^2+Y^2)}$. Le déplacement planimétrique total pour la période d'observation pour le glissement de Grand Ilet est donc de l'ordre de 75,6 cm et la vitesse moyenne associée de l'ordre de 17,4 cm/an.

c) Déplacement altimétrique

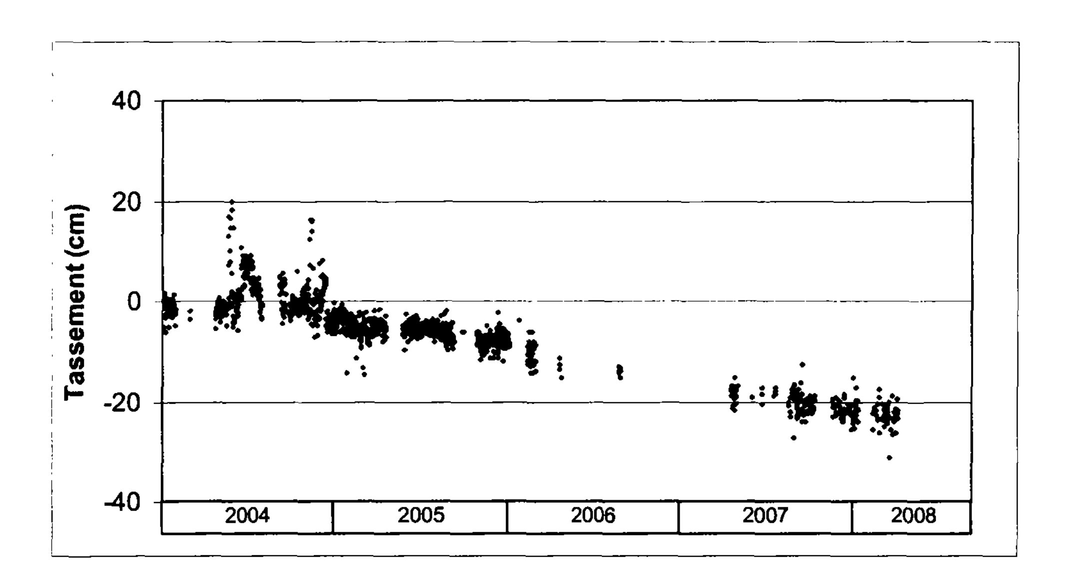


Illustration 11 : Grand Ilet : déplacement altimétrique (tassement)

Pour la période d'observation allant du 30 Décembre 2003 au 6 Mai 2008, le tassement total mesuré est de l'ordre de 21,7 cm soit une vitesse de déplacement moyenne de l'ordre de 5,0 cm/an.

La dispersion des points de positionnement ne permet pas d'affirmer la présence de phases d'accélération du tassement mais uniquement une vitesse relativement constante au cours des différentes années d'observation.

Le rapport entre le déplacement planimétrique et le déplacement altimétrique pour le glissement de Grand Ilet est de l'ordre de 3,5, ce qui donne un angle de déplacement incliné de l'ordre de **16 °** vers le nord-est.

d) Orientation du mouvement

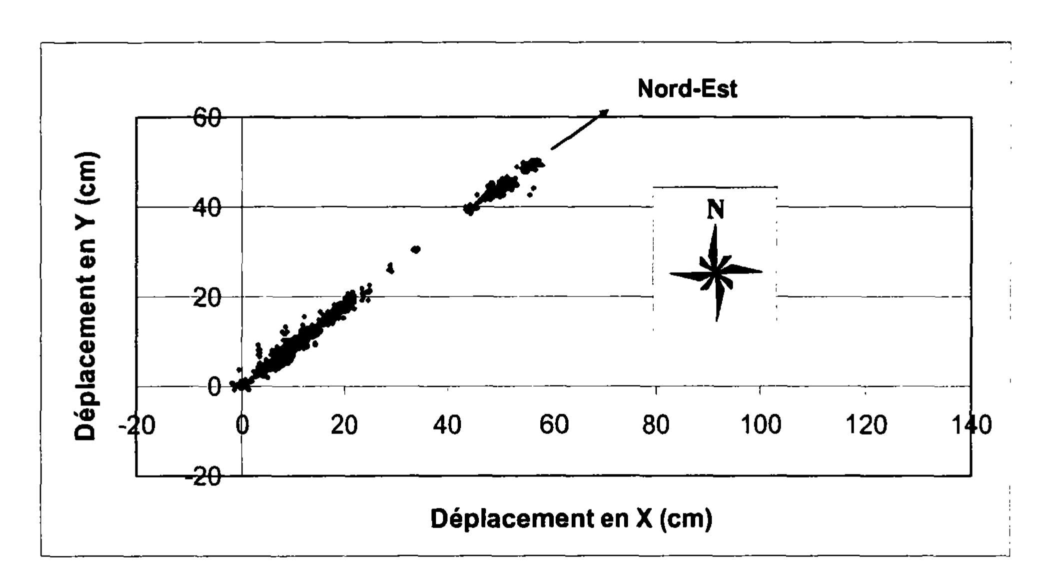


Illustration 12 : Grand Ilet : orientation du mouvement

La direction du mouvement au niveau de la station GPS permanente est orientée de façon uniforme vers le Nord-Est (orientation de l'ordre de N45°-55°).

3.2.2. Glissement de Hell-Bourg

a) Déplacement planimétrique en X

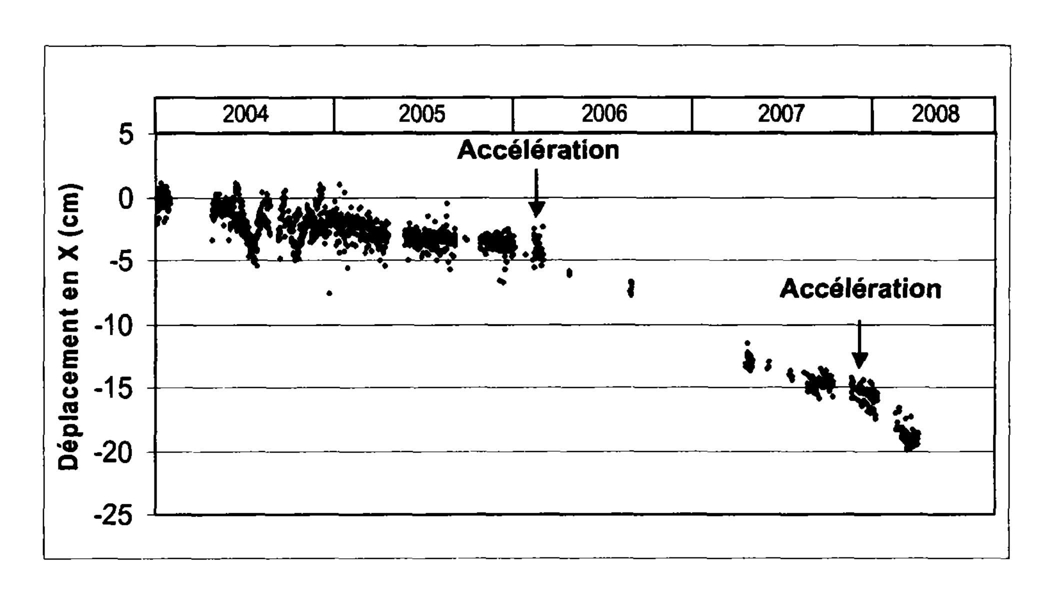


Illustration 13 : Hell-Bourg : déplacement planimétrique en X (Est)

Pour la période d'observation allant du 30 Décembre 2003 au 6 Mai 2008, le déplacement planimétrique total mesuré vers l'Est est de l'ordre de 19,1 cm soit une vitesse de déplacement moyenne de l'ordre de 4,4 cm/an.

La vitesse de déplacement planimétrique vers l'Est est relativement constante jusqu'à l'année 2005 puis une accélération du mouvement s'est produite au cours de l'année 2006 ainsi qu'à la fin de l'année 2007.

b) Déplacement planimétrique en Y

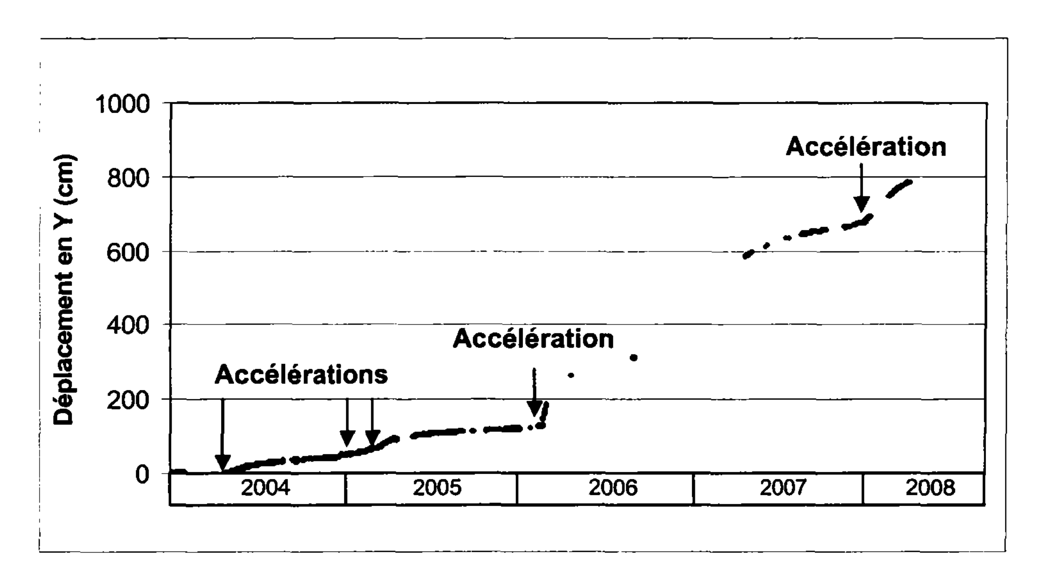


Illustration 14 : Hell-Bourg : déplacement planimétrique en Y (Nord)

Pour la période d'observation allant du 30 Décembre 2003 au 6 Mai 2008, le déplacement planimétrique total mesuré vers le Nord est de l'ordre de 786,7 cm (soit environ 7,87 m) et la vitesse de déplacement moyenne associée de l'ordre de 180,5 cm/an (soit environ 1,81 m/an et une moyenne de 15 cm/mois).

Plusieurs phases d'accélération et de ralentissement du mouvement au cours des différentes années sont visibles avec notamment une très forte accélération au cours de l'année 2006. L'écart entre les données avant et après la période de lacune (années 2006 et 2007) semble indiquer qu'une forte accélération du mouvement s'est également produite pendant la saison des pluies.

Dans ce cas, le bruit de fond devient négligeable comparé à l'amplitude des déplacements mesurés.

Les précédents graphiques montrent que la composante en Y est la composante majeure de la résultante planimétrique du glissement de Hell-Bourg. La rapport entre le déplacement planimétrique en Y et le déplacement planimétrique en X est de l'ordre de 41,2.

Le déplacement et la vitesse de déplacement de la résultante planimétrique R peuvent ensuite être calculés à l'aide des deux composantes en X et en Y : $R = \sqrt{(X^2+Y^2)}$. Le déplacement planimétrique total pour la période d'observation pour le glissement de Hell-Bourg est donc de l'ordre de 786,9 cm (soit environ 7,87 m) et la vitesse associée de l'ordre de 180,7 cm/an (soit environ 1,81 m/an).

c) Déplacement altimétrique

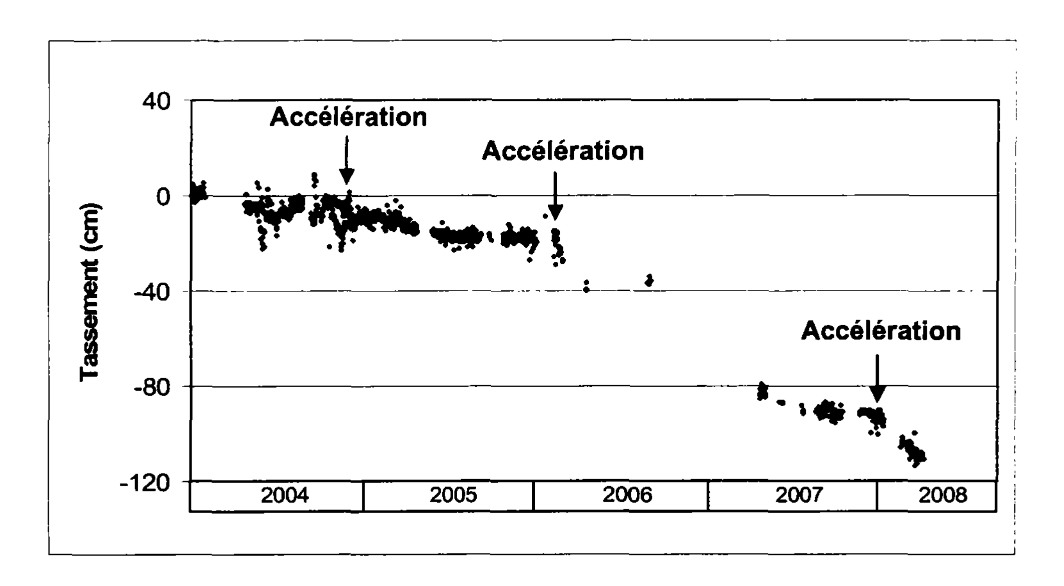


Illustration 15 : Hell-Bourg : déplacement altimétrique (tassement)

Pour la période d'observation allant du 30 Décembre 2003 au 6 Mai 2008, le tassement total mesuré est de l'ordre de 110,8 cm (soit environ 1,11 m) et la vitesse de déplacement moyenne associée de l'ordre de 25,4 cm/an.

La vitesse de tassement est relativement constante pendant l'année 2004 puis différentes phases d'accélération de ce tassement se sont produites au cours des années 2005, 2006 et fin 2007.

Le rapport entre le déplacement planimétrique et le déplacement altimétrique pour le glissement de Hell-Bourg est de l'ordre de 7,1 (soit environ 2 fois plus que le rapport pour le glissement de Grand Ilet), ce qui donne un angle de déplacement incliné de 8° vers le nord.

d) Orientation du mouvement

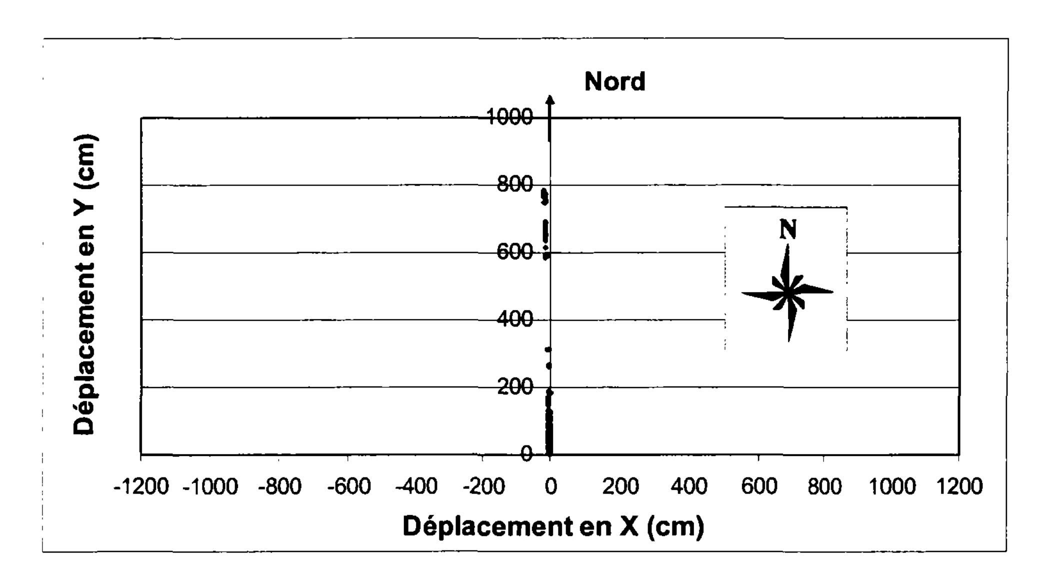


Illustration 16 : Hell-Bourg : orientation du mouvement

La direction du mouvement au niveau de la station GPS permanente est orientée pleinement vers le Nord. Cependant, il semblerait que cette direction se soit très légérement orientée vers l'Ouest (de l'ordre de 1°) au cours de la période d'observation.

Cette tendance serait à confirmer avec la poursuite des observations dans les années à venir.

3.2.3. Bilan

Pour la période d'observation allant du 30 Décembre 2003 au 6 mai 2008, le bilan est le suivant :

	Glissement Grand Ilet	Glissement Hell-Bourg
Déplacement total en X (cm)	56.5	19.1
Vitesse de déplacement moyenne en X (cm/an)	13.0	4.4
Déplacement total en Y (cm)	50.2	786.7
Vitesse de déplacement moyenne en Y (cm/an)	11.5	180.5
Déplacement planimétrique total (cm)	75.6	786.9
Vitesse de déplacement planimétrique moyenne (cm/an)	17.4	180.7
Tassement total (cm)	21.7	110.8
Vitesse de tassement moyenne (cm/an)	5.0	25.4
Rapport planimétrie/altimétrie	3.5	7.1
Orientation	Nord-Est	Nord

Illustration 17 : Bilan des observations (30 Déc 2003–6 Mai 2008)

3.3. COMPARAISON ENTRE LES DONNEES ISSUES DES GPS PERMANENTS ET DES BORNES MVTERRE

Dans le cadre du projet de recherche MVTerre, des campagnes de mesure de positionnement géodésiques ont été réalisées dans le massif du Piton des Neiges (et notamment dans le cirque de Salazie) afin de détecter et de suivre les mouvements de grand ampleur ainsi que les déplacements associés : les campagnes de mesure sont réalisées deux fois par an (avant et après la saison cyclonique).

Dans le but de s'assurer que les résultats obtenus avec les stations GPS permanentes sont cohérents avec les résultats obtenus avec les bornes MVTerre à proximité, un comparatif de ces données a été réalisé.

Les bornes MVTerre utilisées pour la comparaison se situent à quelques centaines de mètres de l'emplacement des stations GPS fixes.



Illustration 18 : Localisation de la borne MVTerre SA056 (secteur Grand Ilet)

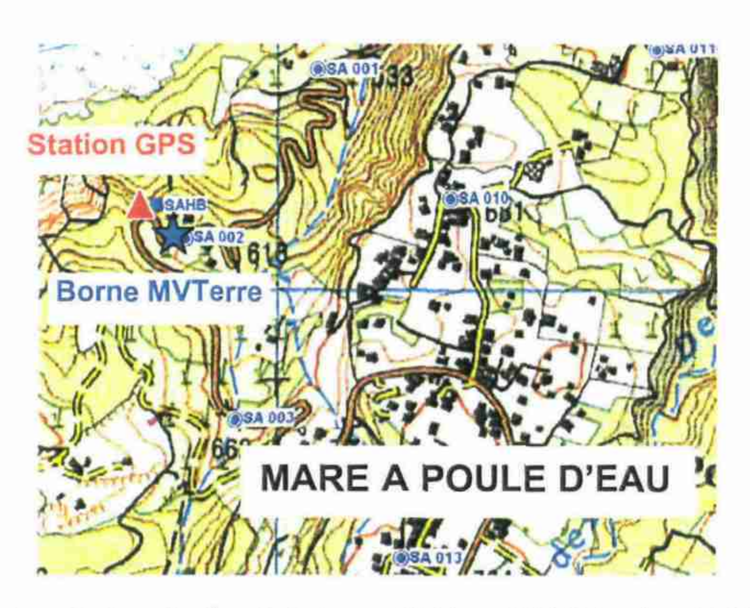


Illustration 19 : Localisation de la borne MVTerre SA002 (secteur Hell-Bourg)

La première campagne de mesure des bornes MVTerre s'est déroulée au mois de décembre 2003 et la dernière aux mois de septembre et octobre 2007. Ainsi, la *comparaison a été réalisée sur cette période :*

- Glissement de Grand Ilet (borne MVTerre SA 056) :

	Station GPS permanente	**Borne MVTerre**
écart XY (m)	0,64	0,60
vitesse de déplacement (cm/an)	17,04	14,40
écart Z (m)	-0,23	-0,22

Illustration 20 : Grand Ilet : comparaison avec la borne MVTerre SA056

- Glissement de Hell-Bourg (borne MVTerre SA002) :

	Station GPS permanente	**Borne MVTerre**
écart XY (m)	6,50	6,60
vitesse de déplacement (cm/an)	172,1	158,30
écart Z (m)	-0,89	-1,55

Illustration 21 : Hell-Bourg : comparaison avec la borne MVTerre SA002

La comparaison des résultats montre que l'ordre de grandeur des mouvements est respecté. Les différences observées sont sans doute dues à l'écart de position des bornes MVTerre par rapport aux stations GPS permanentes ou à la dispersion des points de positionnement GPS.

Depuis septembre 2007, toujours dans le cadre du projet MVTerre, de nouvelles bornes ont été installées à quelques mètres des stations GPS permanentes : le spit SAHB pour le glissement de Hell-Bourg et SAGI pour le glissement de Grand Ilet. Une campagne de mesures a depuis été réalisée courant Février 2007. Ainsi, une nouvelle comparaison des écarts mesurés par ces spits et par les stations GPS permanentes permet d'apprécier la précision des mesures :

	Station GPS permanente	**Spit MVTerre SAGI**
écart XY (cm)	7.4	6.1
écart Z (cm)	-1.7	-4.9

Illustration 22 : Grand Ilet : comparaison avec le spit MVTerre SAGI

	Station GPS permanente	**Spit MVTerre SAHB**
écart XY (cm)	111.3	94.9
écart Z (cm)	-13.2	-14

Illustration 23 : Hell-Bourg : comparaison avec le spit MVTerre SAHB

La comparaison des résultats montre que l'ordre de grandeur des mouvements est respectée. Néanmoins, il existe toujours des différences alors que les spits sont presque exactement au même emplacement que les stations GPS. Les différences observées sont donc certainement dues à la dispersion des points de positionnement des stations GPS permanentes.

3.4. OBTENTION DES COURBES DE VITESSE DE DEPLACEMENT

Dans un premier temps, les courbes de déplacement on été lissées afin d'améliorer la visualisation des différentes phases du mouvement. Des méthodes mathématiques ont été utilisées pour opérer ce lissage : l'utilisation des moyennes mobiles à différents intervalles *ou encore la méthode des moindres carrés.*

Ces méthodes ne donnant pas des résultats satisfaisants, le lissage a été effectué grâce à des régressions linéaire ou polynômiale. Les courbes de déplacement ont donc été sectionnées en plusieurs tronçons afin d'appliquer pour chaque tronçon une fonction de *régression adéquate.* Après lissage, les tronçons *ont été raccordés manuellement dans le* but de supprimer les sauts de valeur (Illustration 24).

Dans un souci de cohérence, un graphique représentant les déplacements bruts et la courbe lissée a été réalisé.

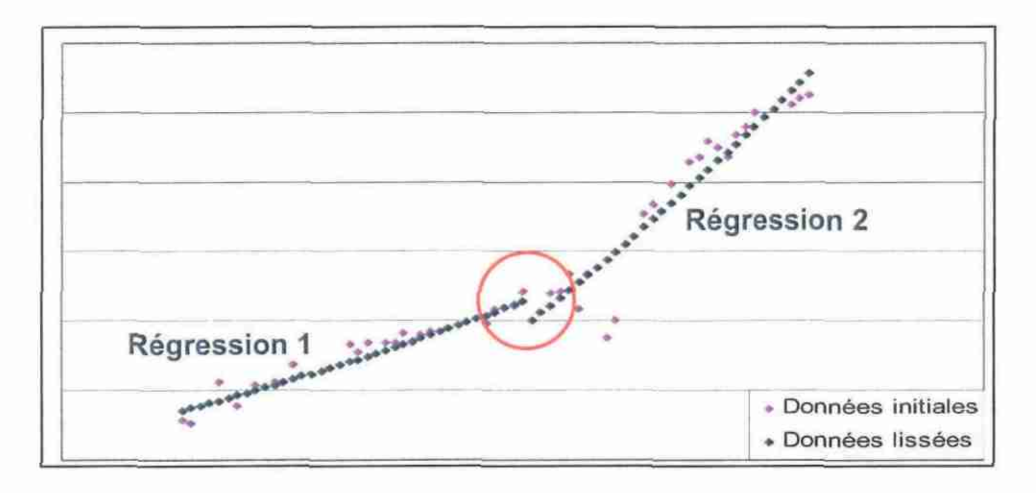


Illustration 24 : Problème de raccordement de tronçons après lissage (exemple de la courbe planimétrique en Y pour le glissement de Hell-Bourg)

Ainsi, le choix a été fait de s'intérresser dans la suite de l'étude :

- au déplacement planimétrique en X pour le glissement de Grand Ilet ;
- au déplacement planimétrique en Y pour le glissement de Hell-Bourg.

Ce choix a été motivé par rapport à la qualité initiale de la visualisation des différentes phases d'accélération.

Dans un deuxième temps, les courbes de vitesse ont été tracées et lissées à partir des courbes de déplacement ajustées ; le pas de temps étant toujours égal à 12h. Elles ont été validées en établissant un retour aux déplacements et en comparant la courbe obtenue avec les données initiales.

3.4.1. Glissement de Grand Ilet

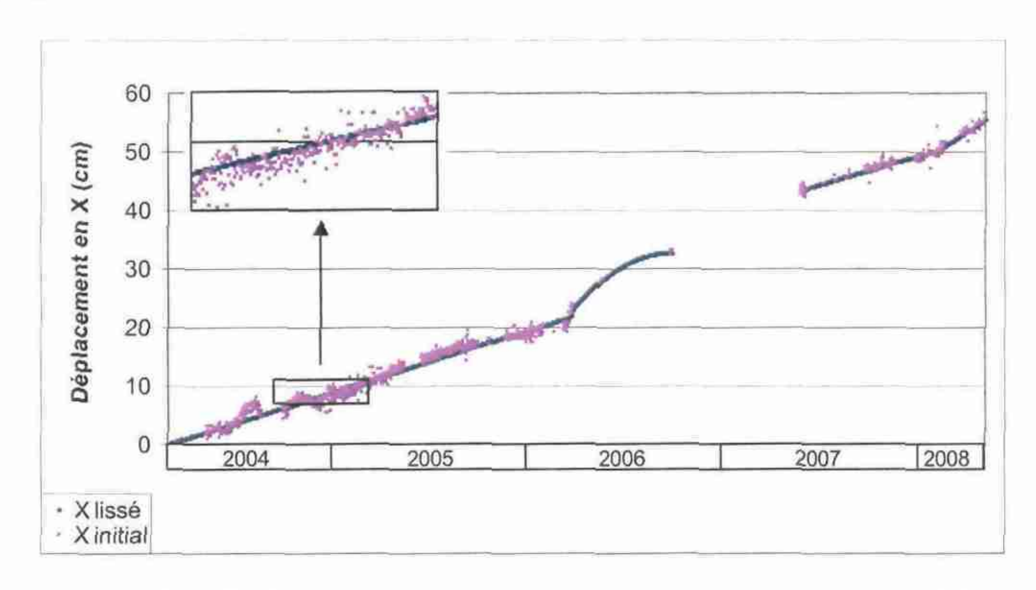


Illustration 25 : Grand Ilet : lissage du déplacement planimétrique en X (Est)

Le zoom sur une partie du graphique permet de visualiser plus précisemment la qualité du lissage et ainsi de valider la courbe de déplacement ajustée.

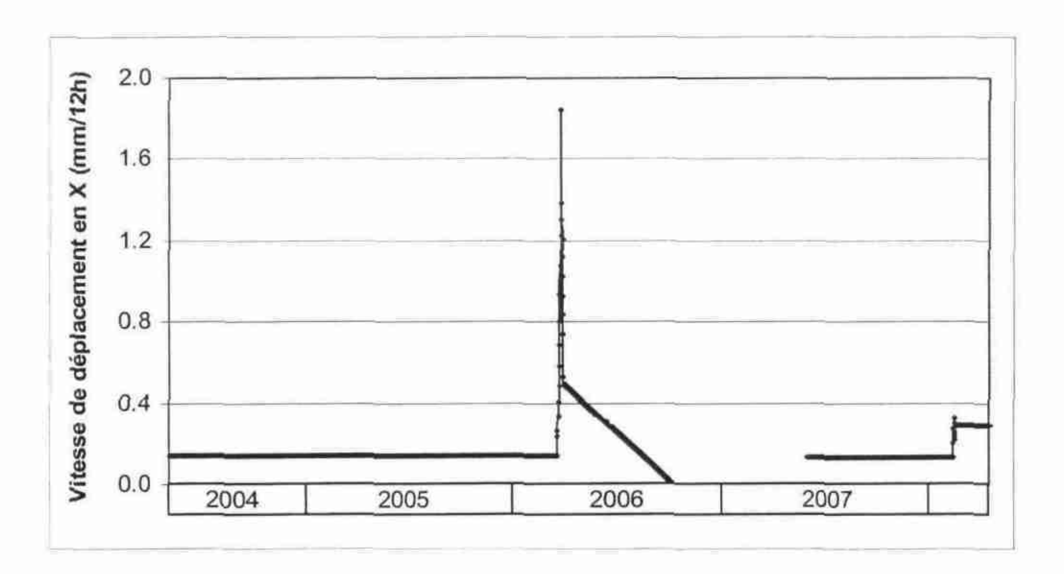


Illustration 26 : Grand Ilet : vitesse de déplacement en X

Le graphique ci-dessus montre que le glissement de Grand Ilet semble avoir une vitesse de déplacement due à son inertie relativement constante de l'ordre de 0,15 mm/12h (= 0,3 mm/jour = 11 cm/an) en dehors des différentes phases d'accélération et de ralentissement observées avant et après les saisons cycloniques.

La courbe présente deux pics d'accélération brutale du mouvement (années 2006 et 2008). A la suite de ces accélérations, le mouvement ralentit progressivement (année 2006) ou se stabilise très rapidement avec une vitesse constante plus élevée (année 2008). Ce comportement du glissement sera à confirmer ultérieurement avec la poursuite des observations.

La dispersion des données initiales ne permet pas de voir d'autres pics d'accélération du mouvement.

3.4.2. Glissement de Hell-Bourg

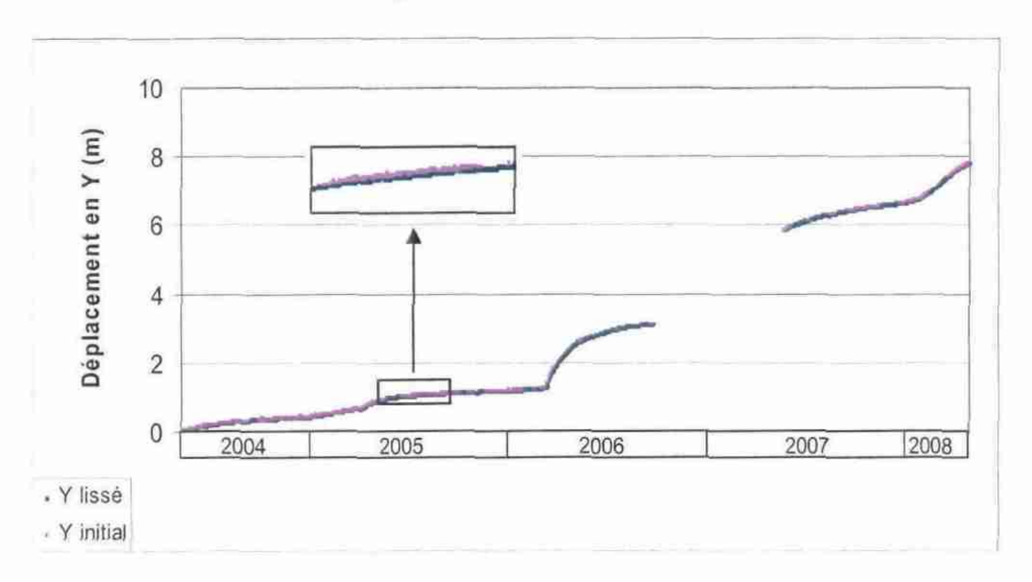


Illustration 27 : Hell-Bourg : lissage du déplacement planimétrique en Y (Nord)

Le zoom sur une partie du graphique permet de visualiser plus précisemment la qualité du lissage et ainsi de valider la courbe de déplacement ajustée.

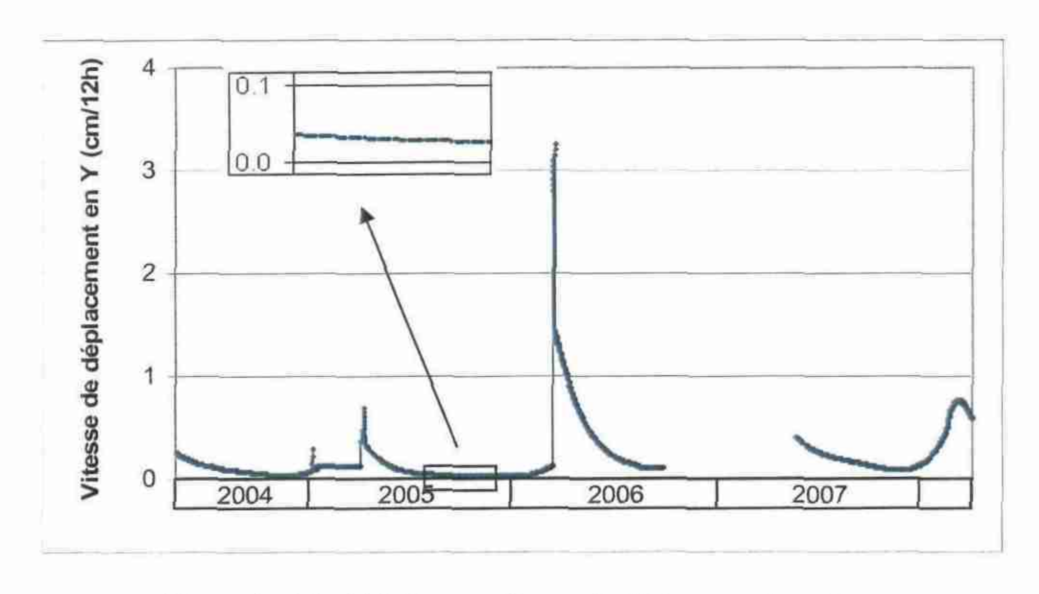


Illustration 28 : Hell-Bourg : vitesse de déplacement en Y

Le graphique ci-dessous met en évidence que le glissement de Hell-Bourg présente une vitesse de déplacement due à son inertie de l'ordre de 0,35 mm/12h (= 0,7 mm/jour = 25,6 cm/an) en dehors des différentes phases d'accélération et de ralentissement observées avant et après les saisons cycloniques.

La courbe de vitesse présente 3 phases d'accélération brutale (quelques jours) du mouvement (années 2005 et 2006 où la vitesse de déplacement atteinte est d'environ 3,25 cm/12h = 6,5 cm/jour). A la suite de ces accélérations, la vitesse de déplacement semble décroitre progressivement, sur plusieurs mois jusqu'à la vitesse de déplacement d'inertie.

La saison 2008 montre un comportement du glissement différent : le mouvement s'est accéléré progressivement puis le ralentissement s'est fait tout aussi progressivement.

4. Analyse combinée de la pluviométrie et des déplacements

4.1. MISE EN RELATION DE LA PLUVIOMETRIE AVEC LE DEPLACEMENT ET LA VITESSE DE DEPLACEMENT

Afin de visualiser la relation entre les différentes phases d'accélération du mouvement et les épisodes pluvieux, les courbes de déplacement planimétrique et de vitesse de déplacement pour chaque site ont été mises en parallèle avec la courbe de pluviométrie correspondante :

- la pluviométrie de Grand Ilet pour le glissement de Grand Ilet ;
- la pluviométrie d'Ilet à Vidot et de Hell-Bourg (données Météo France) pour le glissement de Hell-Bourg.

L'intervalle de temps entre 2 points de positionnement consécutifs est de 12h alors que les données pluviométriques à disposition étaient journalières. Ainsi, les données pluviométriques ont été dupliquées et divisées par 2 afin d'obtenir également un intervalle de temps égal à 12h.

De plus, les premières valeurs des séries de déplacement et de vitesse ont été tronquées afin de ne pas commencer l'analyse au milieu d'une saison des pluies (saison 2004) et ainsi de faire de fausses interprétations sans savoir ce qu'il s'est passé au début de cette saison.

4.1.1. Glissement de Grand Ilet

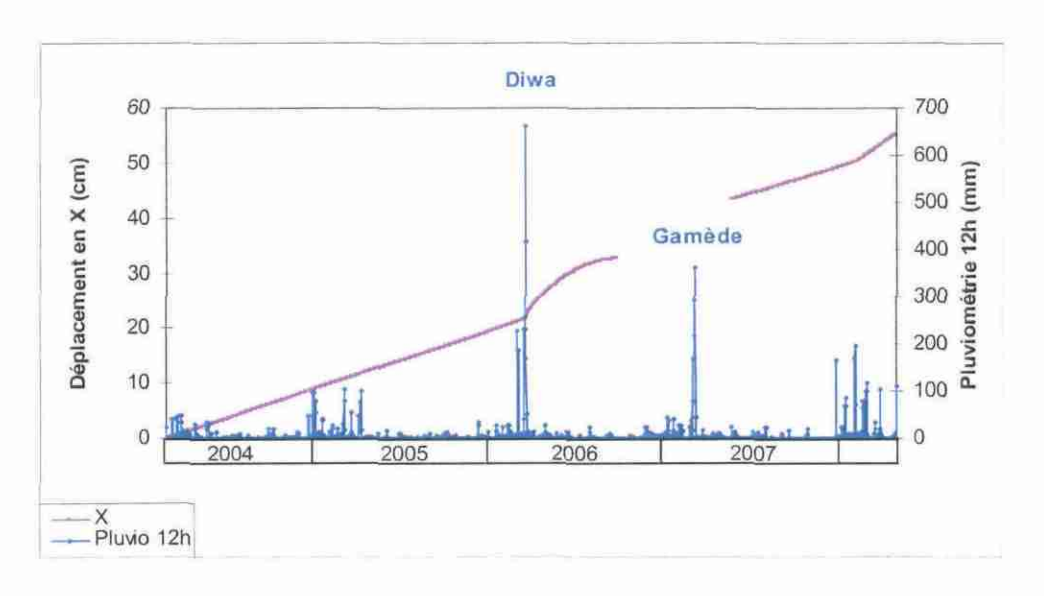


Illustration 29 : Grand Ilet : déplacement en fonction de la pluviométrie

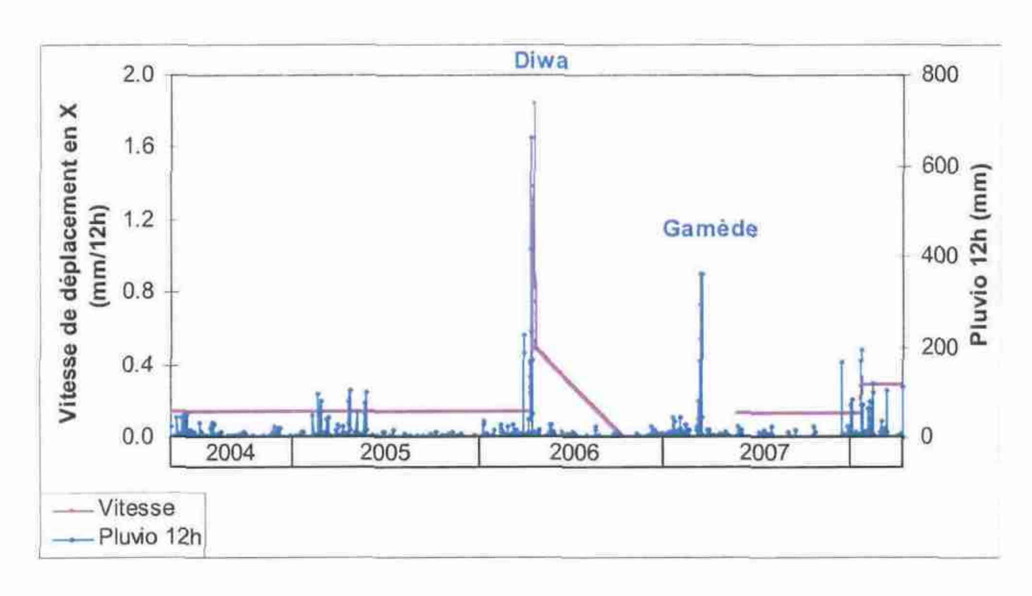


Illustration 30 : Grand Ilet : vitesse en fonction de la pluviométrie

La courbe de vitesse de déplacement permet de mieux visualiser la relation avec la pluviométrie. Grâce à ces graphiques, il est possible d'affirmer que :

- la saison des pluies 2004-2005 a été marquée par un cumul de près de 2400 mm au cours des mois de décembre à avril, sans accélération perceptible des déplacements (tout du moins ne pouvant être mis en évidence dans les enregistrements de la station GPS). La saison a été marquée par un étalement assez homogène des précipitations, sans épisode isolé d'envergure (cumul maximum d'environ 500 mm sur 15 jours), ce qui ne semble pas avoir entrainé de réponse significative de la part du glissement (en tout cas du compartiment accueillant la station GPS) ;

- l'accélération des déplacements observée en 2006 est due au passage de la forte tempête tropicale Diwa, ayant généré un cumul pluviométrique sur le poste de Grand Ilet de 3143 mm du 3 au 8 mars (2156 mm les 5 et 6 mars). Diwa a entrainé, avec un temps de réaction du glissement après le pic de pluie de quelques jours, une accélération des déplacements jusqu'à 3,5 à 4 mm/jour (soit 15 fois plus que la normale). Le pic de vitesse enregistré est intervenu avec un décalage de 6 jours par rapport au pic de précipitations. Le retour à « la normale » (amortissement jusqu'à un retour à des vitesses de déplacement comparables à celles avant Diwa) a nécessité environ 6 mois ;

- un autre pic d'accélération a été enregistré au cours de la saison des pluies 2007-2008 (fin janvier-début février). Celle-ci a été marquée par l'absence d'événement météorologique à caractère exceptionnel mais par la succession entre le 20 décembre et le 25 mars de plusieurs épisodes pluvieux importants (331 mm le 20/12, 310 mm les 8 et 9/01, 740 mm les 29 et 30/01, 440 mm les 23 et 24/02, etc), générant au final un cumul de pluie important. Entre le 19 décembre et fin janvier 2008, période à laquelle les mouvements se sont accélérés, il a ainsi été enregistré sur le poste de Grand Ilet environ 2400 mm de précipitations. On rappellera que lors de la saison des pluies 2004-2005, le même cumul mais réparti sur environ 4 mois n'avait pas entrainé d'accélération perceptible des déplacements. Suite à cette accélération, les mouvements se sont stabilisés à une vitesse constante supérieure à celle observée avant jusque-là ;

- l'épisode cyclonique Gamède (février 2007) a vraisemblablement entrainé une accélération significative du mouvement, mais l'absence d'enregistrement continu sur cette période (pannes de longue durée) ne permet pas de le vérifier et de confirmer l'existence d'une relation pluies/déplacements étroitement liée.

4.1.2. Glissement de Hell-Bourg

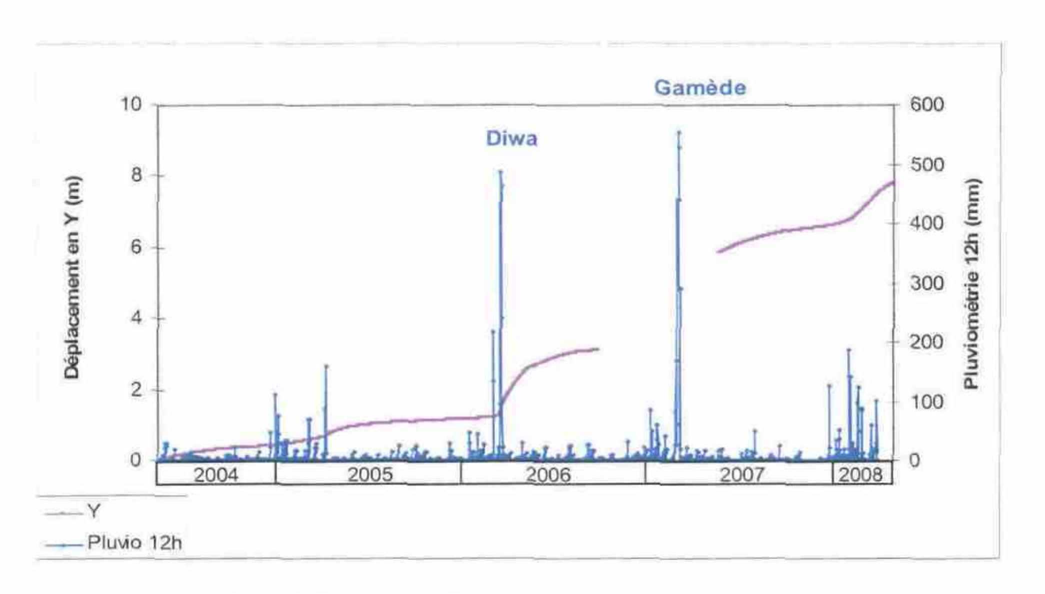


Illustration 31 : Hell-Bourg : déplacement en fonction de la pluviométrie

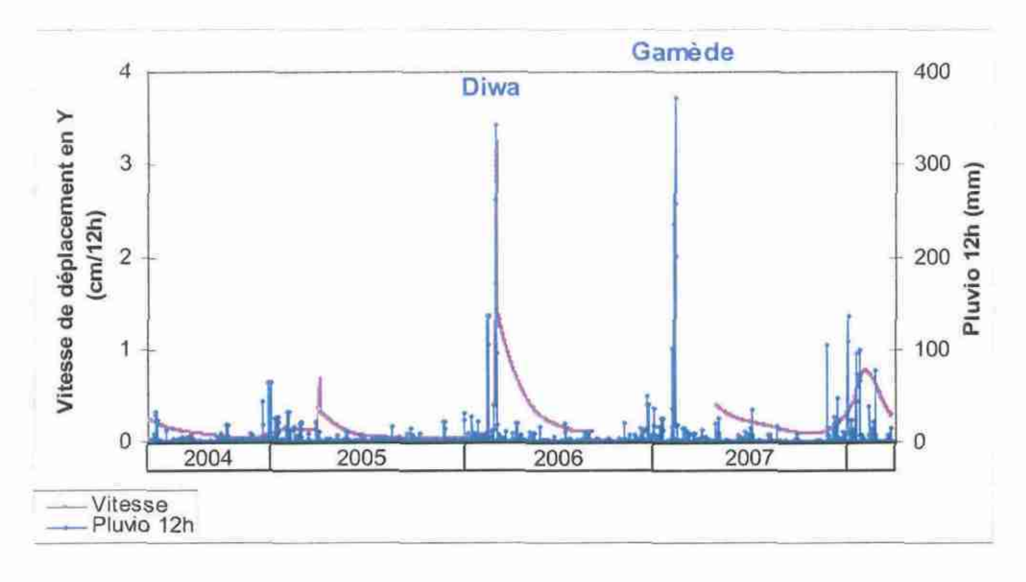


Illustration 32 : Hell-Bourg : vitesse en fonction de la pluviométrie (Ilet à Vidot)

Comme pour le glissement de Grand Ilet, la courbe de vitesse de déplacement permet de mieux visualiser la relation avec la pluviométrie. Grâce à ces graphiques, il est possible d'affirmer que :

- la première phase d'accélération, relativement modeste, est survenue de façon progressive en fin d'année 2004, en réponse à une pluviométrie relativement importante (mais sans épisode exceptionnel) au cours du mois de décembre (270 mm au cours de la première quinzaine, 340 mm environ au cours de la seconde quinzaine, soit au total environ 610 mm, avec un maximum en 24 h de l'ordre de 130 mm). Suite à cette accélération, les mouvements se sont poursuivis pendant environ 3 mois à vitesse constante. Sur cette période, la pluviométrie a été relativement modeste (cumul maximum sur 15 jours de 183 mm ; 520 mm sur la période début janvier à mi-mars), mais suffisante pour qu'il n'y ait pas amortissement mais au contraire maintien de la vitesse acquise par le mouvement après la première accélération. Une deuxième accélération, brutale cette fois, s'est déroulée sur quelques jours à partir du 20 mars 2005. La pluviométrie d'Ilet à Vidot ne semble pas l'expliquer. Enfin, suite à cet épisode, les précipitations ont été très limitées et le mouvement a connu un ralentissement progressif (retour « à la normale » - c'est-à-dire à une vitesse comparable à ce qu'elle était avant la première accélération – vers le début du mois d'août, nécessitant ainsi environ 4 mois).

On tirera comme premier enseignement que la sensibilité du glissement à la pluviométrie semble importante, des cumuls relativement limités pouvant entrainer un début d'accélération sensible des mouvements et la persistance d'une pluviométrie modeste mais plus ou moins continue étant de nature à entretenir cette phase d'accélération.

- la deuxième phase d'accélération est due au passage de la forte tempête tropicale Diwa au cours de l'année 2006. L'accélération a été très brutale, avec un pic atteignant près de 7 cm/jour, observé trois jours environ après le pic de pluies. Diwa a généré un cumul de précipitations sur le poste d'Ilet à Vidot de l'ordre de 1860 mm du 3 au 8 mars (523 mm et 687 mm les 3 et 4 mars). Après cet épisode, les pluies ont été faibles jusqu'en fin de saison humide. Les mouvements ont alors connu un ralentissement rapide dans un premier temps (pas de pluies significatives alimentant le mécanisme comme au cours des premiers mois de 2005), puis un amortissement progressif dans un second temps avec également un retour « à la normale » intervenant au bout de 4 mois environ ;

- une troisième phase d'accélération a été enregistrée au cours de la saison des pluies 2007-2008. Celle-ci n'a été affectée par aucun épisode cyclonique exceptionnel mais est caractérisée par la succession entre le 20 décembre et le 25 mars de plusieurs épisodes pluvieux importants (210 mm le 20/12, 300 mm au cours de la première décade de janvier, 536 mm du 29 au 31/01, près de 800 mm la seconde quinzaine de février, 155 mm le 25/03). Entre le 19 décembre 2007 et début mars 2008, période à laquelle l'accélération a atteint son pic, le cumul enregistré sur le poste d'Ilet à Vidot a été d'environ 2170 mm. Contrairement à l'accélération de 2006, et en raison de l'absence d'épisode majeur, l'accélération a cette fois été progressive, atteignant 1,5 cm/jour, avant que le ralentissement n'intervienne tout aussi progressivement

(l'amortissement étant contrarié par les pluies survenues au cours de la fin de la saison humide) ;

- le glissement semble avoir connu au cours de la saison 2006/07 un comportement comparable à celui enregistré au moment du passage de Diwa. On observe en effet la seconde partie d'une phase de ralentissement des mouvements, après une phase d'accélération non visible en raison des problèmes d'acquisition de la station GPS mais très probable et pouvant être rattachée au passage du cyclone tropical intense Gamède.

Globalement, comparé aux résultats du glissement de Grand Ilet, les données sur le glissement de Hell-Bourg permettent d'affirmer avec plus de pertinence l'existence d'une relation systématique entre la pluviométrie et les phases d'accélération du glissement de terrain. En effet, ces phases d'accélération sont plus visibles et correspondent à des épisodes pluvieux connus.

La deuxième accélération du mouvement observée au cours de l'année 2005 reste inexpliquée par la pluviométrie d'Ilet à Vidot.

Afin de comprendre cette accélération, la pluviométrie des sites voisins a été étudiée et la pluviométrie du site de Hell-Bourg semble expliquer l'ensemble des phases d'accélération du mouvement.

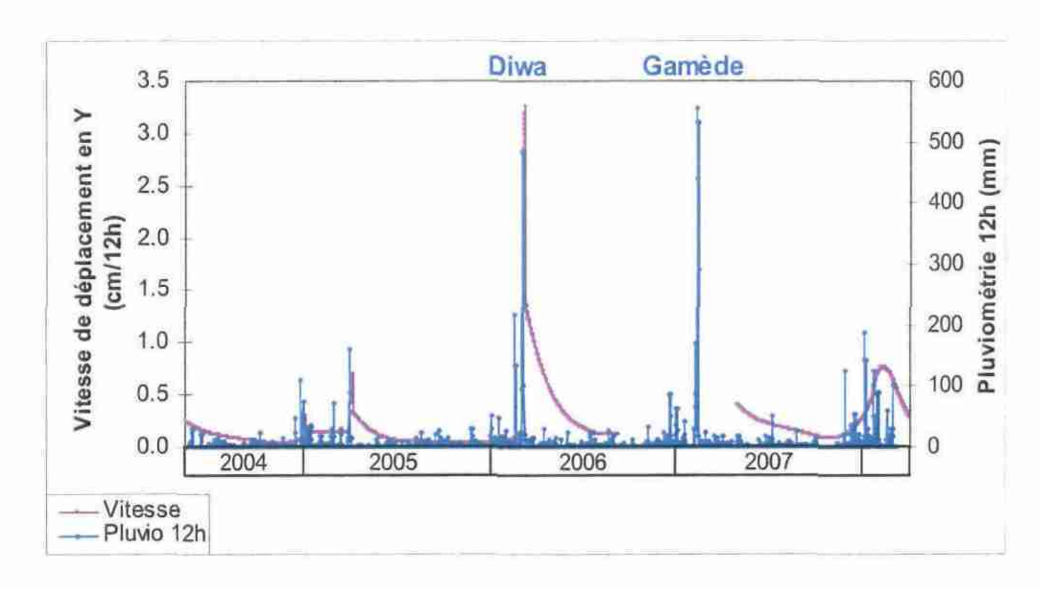


Illustration 33 : Hell-Bourg : vitesse en fonction de la pluviométrie (Hell-Bourg)

A de faibles distances d'écart, les pluviométries dans le cirque de Salazie peuvent donc présenter des épisodes pluvieux différents. Si les observations sont prolongées dans les années à venir, il sera judicieux de réfléchir à l'emplacement optimal des pluviomètres par rapport à l'emplacement des stations GPS permanentes.

Grâce aux données sur le glissement de Hell-Bourg, il est possible de mettre en relation le pic de pluie d'un événement particulier avec le pic de vitesse du mouvement associé.

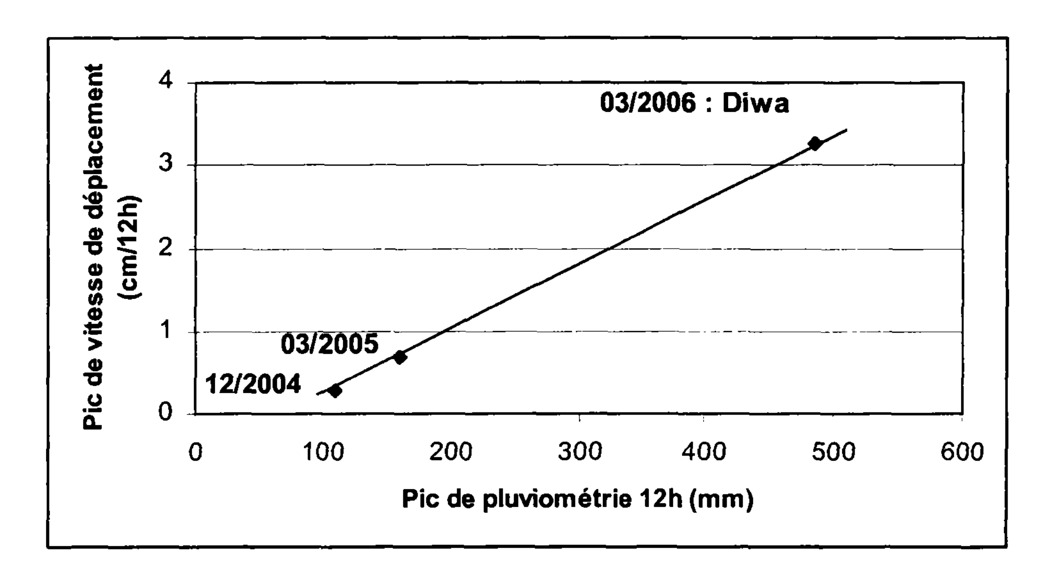


Illustration 34 : Relation pic de pluie/pic de vitesse (exemple du glissement de Hell-Bourg)

Le graphique ci-dessus (Illustration 34) montre l'existence d'une linéarité probable entre le pic de pluie et le pic de vitesse associé. Cependant, le nombre d'événements pluvieux n'est pas assez important pour que cette observation soit considérée comme un véritable enseignement. Cette tendance sera à confirmer dans les années à venir grâce à la poursuite des observations.

De plus, le graphique ne prend pas en compte la saison 2008. En effet, celle-ci ne présente pas de pic de très forte de pluie mais montre néanmoins une pluviométrie soutenue à l'origine d'une accélération du mouvement.

Les données sur Grand Ilet ne permettent pas de réaliser la même étude.

4.2. CORRELATION DEPLACEMENT/PLUVIOMETRIE SUR UNE SAISON DES PLUIES

Dans le but d'approfondir les connaissances sur la relation entre la pluviométrie et le déplacement des glissements de terrain, le cumul de pluie durant la saison des pluies (du 15 Novembre au 30 Avril) a été mis en relation avec le déplacement planimétrique (en X pour Grand Ilet et en Y pour Hell-Bourg) associé à cette période.

Dans un premier temps, ce travail a été effectué en mettant en relation le cumul de pluie de 1 et 2 mois autour des différents pics de pluviométrie et le déplacement associé à cette même période. Il s'est révélé que le nombre d'événements pluvieux et les informations sur chacun des événements n'étaient pas assez importants pour que l'on puisse tirer un quelconque enseignement de ces graphiques.

Ainsi, l'étude a été menée sur les saisons de pluie entières afin de pouvoir intégrer d'autres informations connues sur les glissements de terrain.

Les saisons de pluie des années 2004 et 2007 n'ont pas été représentées puisque le projet a débuté au milieu de la saison 2004 (toutes les données ne sont donc pas disponibles) et que la saison 2007 se situe dans la zone de lacunes des GPS.

4.2.1. Glissement de Grand Ilet

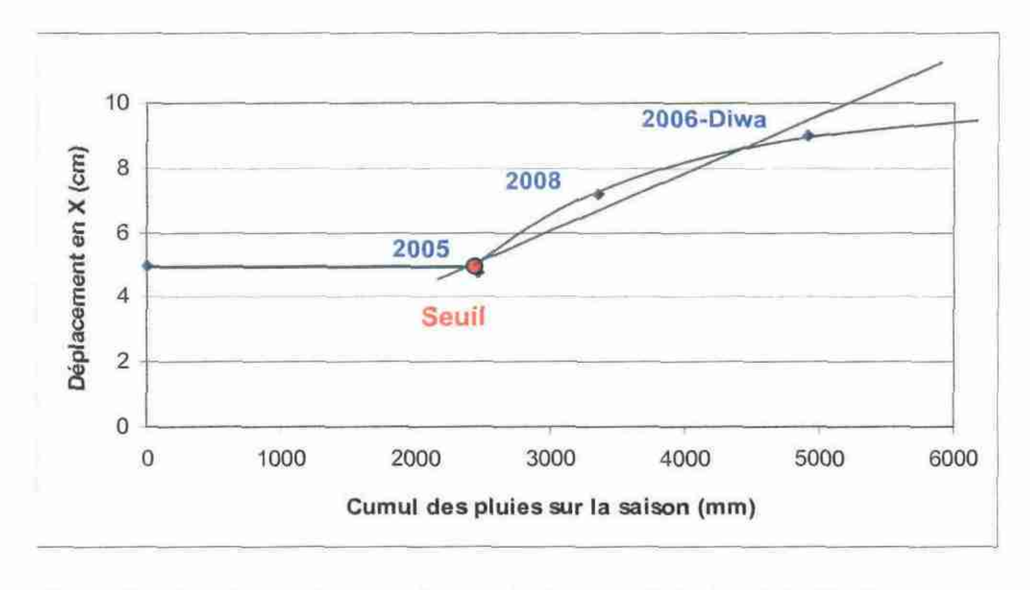


Illustration 35 : Grand Ilet : corrélation déplacement/pluviométrie (15 Nov-30 Avr)

La vitesse de mouvement du glissement de Grand Ilet due à son inertie est de l'ordre de 11 cm/an. Pour une saison des pluies (5 mois et demi), cette vitesse est donc de l'ordre de 5 cm/saison.

Le graphique ci-dessous (Illustration 35) montre qu'il est nécessaire de dépasser un seuil de pluies pour observer une accélération du déplacement ; ce seuil se situant aux alentours de 2400 mm sur la saison. Cette valeur est cohérente avec les données de la saison humide 2004-2005, au cours de laquelle il est tombé cette quantité d'eau sans qu'une accélération significative du glissement n'ait été perçue.

Au-delà de ce seuil, le nombre d'années d'observation est trop faible pour apprécier correctement le mécanisme de mouvement du glissement de terrain, et notamment pour trancher entre l'hypothèse d'une relation pluies/déplacements linéaire et l'hypothèse selon laquelle cette relation aurait tendance à s'amortir jusqu'à atteindre un palier (à partir d'un cumul de précipitations de l'ordre de 5000 mm) à partir duquel un accroissement des précipitations n'aurait plus d'incidence sur l'ampleur des déplacements associés.

La poursuite des observations permettra d'argumenter en faveur de l'une ou l'autre de ces hypothèses.

4.2.2. Glissement de Hell-Bourg

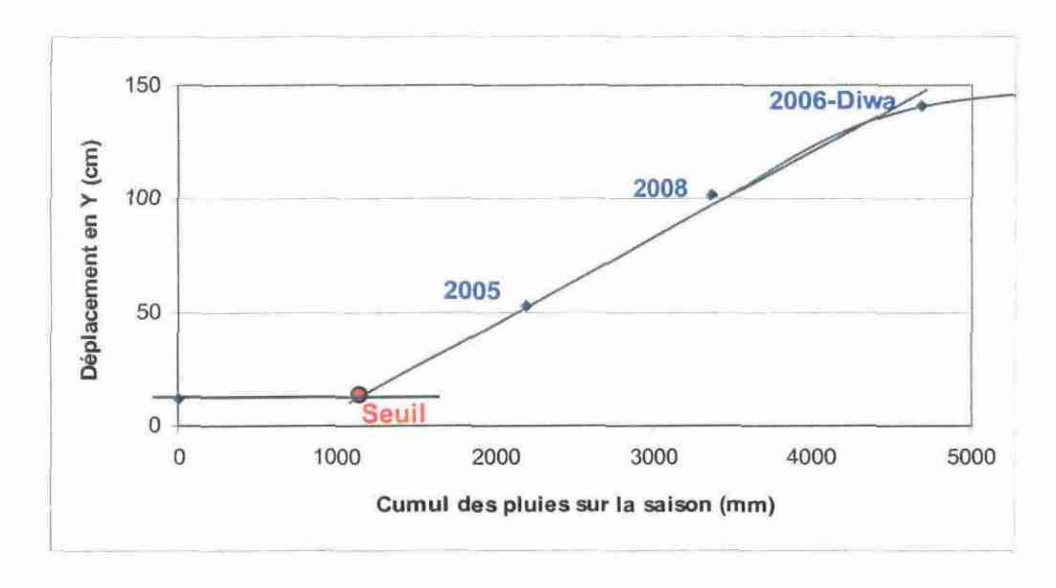


Illustration 36 : Hell-Bourg : corrélation déplacement/pluviométrie (15 Nov-30 Avr)

La vitesse de mouvement du glissement de Hell-Bourg due à son inertie est de l'ordre de 25,6 cm/an. Pour une saison des pluies (5 mois et demi), cette vitesse est donc de l'ordre de 11,7 cm/saison.

Comme pour le glissement de Grand Ilet, le graphique ci-dessous (Illustration 36) montre qu'il est nécessaire de dépasser un seuil de pluies pour observer une accélération du déplacement ; ce seuil se situant aux alentours de 1200 mm sur la saison.

Au-delà de ce seuil, le nombre d'années d'observation est trop faible pour apprécier correctement le mécanisme de mouvement du glissement de terrain, et notamment pour trancher entre l'hypothèse d'une relation pluies/déplacements linéaire et l'hypothèse selon laquelle cette relation aurait tendance à s'amortir jusqu'à atteindre un palier (à partir d'un cumul de précipitations de l'ordre de 5000 mm) à partir duquel un accroissement des précipitations n'aurait plus d'incidence sur l'ampleur des déplacements associés.

La poursuite des observations permettra d'argumenter en faveur de l'une ou l'autre de ces hypothèses.

4.2.3. Estimation des valeurs de déplacement

Dans les deux cas de comportement des glissements de terrain (linéarité ou palier), il est alors possible de prévoir un ordre de grandeur des déplacements associés à des scénarii de pluie.

Données :

- cumul de pluie moyen pour une saison cyclonique dans le cirque de Salazie : 3000 mm ;

- pluie décennale journalière sur le site de Mare à Vieille Place : 1000 mm

- pluie centennale journalière sur le site de Mare à Vieille Place : 1560 mm

- record pluviométrique mensuel pour le cirque de Salazie : 3590 mm

Ces données sont issues de l'atlas climatique de la Réunion de Météo France (Soler, 1997) ainsi que du rapport BRGM RP-56364-FR sur l'étude hydrogéomorphologique de la Rivière du Mât (Stollsteiner Ph. - collab. Aunay B., 2008).

4 scénarii différents ont été choisis pour ces prévisions :

- *cumul de pluie moyen dans une saison pour le cirque de Salazie* : 3000 mm ;

- cumul de pluie moyen + pluie décennale journalière dans une saison : 4000 mm (3000 + 1000 = 4000 mm) ;

- cumul de pluie moyen + pluie centennale journalière dans une saison : 4560 mm (3000+1560 = 4560 mm) ;

- cumul de pluie moyen dont record mesuel de pluviométrie : 6045 mm (3000*4,5/5,5 + 3590 = 6045 mm).

Les déplacements planimétriques des glissements de terrain (en X pour Grand Ilet et en Y pour Hell-Bourg) associés à ces pluviométries sont répertoriés dans les tableaux suivants :

Pluviométrie (mm)	Déplacement : courbe linéaire (cm)	Déplacement : courbe palier (cm)
3000	6	6.5
4000	8	8.2
4560	8.7	8.7
6045	11.5	9.5

Illustration 37 : Grand Ilet : Prévision des déplacements en X

Pluviométrie (mm)	Déplacement : courbe linéaire (cm)	Déplacement : courbe palier (cm)
3000	80	80
4000	120	120
4560	140	140
6045	200	145

Illustration 38 : Hell-Bourg : Prévision des déplacements en Y

Au-delà d'un cumul de pluie environ égal à 5000 mm pour les deux glissements, les résultats sont significativement différents (plusieurs cm voire dizaine de centimètres d'écart) suivant l'hypothèse considérée (linéarité ou palier). Logiquement, les déplacements sont moins importants dans le cas de l'existence d'un palier.

4.2.4. Bilan et interprétation

Il existe une relation directe pluies/déplacements, qui s'explique probablement par un phénomène de mise en pression de la(des) surface(s) de cisaillement par les eaux d'infiltration rejoignant le corps du glissement. La persistance d'un déplacement minimum en période sèche (11 cm/an pour Grand Ilet et 25 cm/an pour Hell-Bourg), alors que les sources sont à l'étiage, montre que la masse instable a une capacité à glisser purement gravitairement. La résistance au cisaillement résiduelle des surfaces de glissement, acquise en grands déplacements, ne suffit plus à contenir la masse glissée. La pluviométrie joue donc le rôle d'accélérateur des mouvements, et n'a donc pas un effet déclencheur.

La réactivité rapide du système pluies/déplacements tend à démontrer que la part d'infiltration vers le plan de glissement est très importante. Elle pourrait ainsi s'expliquer par le fait que ces infiltrations se font prioritairement, et de façon assez directe, par le biais d'un réseau de fissures émergeant en surface (celui-ci étant voué à voir son ouverture s'accroitre du fait de la poursuite des mouvements), et sont entretenues, dans un second temps, par les infiltrations directes à travers le matériel brèchique constituant les corps des deux glissements de terrain (avec des apports persistants dans le temps pouvant provenir de petits aquifères perchés faisant office de zones tampon, voire de petites mares sèches présentes sur les plateaux). Ce schéma permettrait d'expliquer le faible temps de réaction du glissement après le pic pluvieux (3 jours pour Hell-Bourg et 6 jours pour Grand Ilet entre le pic de pluie dû au passage de Diwa et le pic de vitesse associé) et le fait que les mouvements ne s'amortissent que lentement après la fin des pluies.

Par ailleurs, on remarquera que le poids de la zone non saturée située au dessus les surfaces principales de glissement, en augmentant rapidement sous effet de l'infiltration lors de fortes pluies, peut jouer un rôle aggravant par accroissement de l'effort déstabilisateur. Cette hypothèse reste toutefois sujette à caution étant donné la faible inclinaison des surfaces de glissement, la part d'effort résistant par mobilisation de la résistance au cisaillement par frottement étant également accrue sous l'effet du poids total des terrains.

L'existence d'un seuil minimum pluviométrique lors d'une saison cyclonique (1200 mm pour Hell-Bourg et 2400 mm pour Grand Ilet) pour générer une accélération significative du mouvement, tend à indiquer que la superficie de la surface de cisaillement est importante, et que l'adjonction d'une certaine quantité d'eau est nécessaire soit pour provoquer une mise en pression brutale et importante mais relativement localisée, soit pour induire une mise en pression plus modeste mais mieux répartie sur la surface de cisaillement.

Le seuil pluviométrique de Hell-Bourg est moitié moins important que celui déterminé pour le glissement de Grand Ilet. Cela pourrait s'expliquer par le fait que, contrairement à Grand Ilet, celui de Hell-Bourg est issu de mesures réalisées dans la partie la plus active du glissement, *où les caractéristiques mécaniques des matériaux mobilisés par le mouvement* sont vraisemblablement les plus remaniées, les rendant ainsi d'autant plus sensibles aux précipitations. De plus, là encore contrairement à Grand Ilet, le secteur de Mare à Poule d'Eau/Hell-Bourg est drainé par plusieurs émissaires, limitant lors de fortes pluies la quantité d'eau susceptible de s'infiltrer dans le corps de glissement, ce qui souligne d'autant plus la forte influence des conditions hydrogéologiques sur le comportement du glissement.

L'examen de la relation pluies/déplacements cumulés sur une saison cyclonique (y compris sur des simulations de saisons très arrosées), montrant une certaine linéarité, voire une tendance à l'infléchissement (au delà d'un seuil pluviométrique de l'ordre de 5000 mm), est plutôt rassurant. Cela tendrait à démontrer que le glissement n'est actuellement pas en capacité à "s'emballer".

Cependant, il est important de garder en mémoire que ces conclusions sont établies à partir d'une analyse sur des saisons de pluies entières et non sur des événements pluvieux particuliers. En effet, le nombre d'années d'observations n'est pas assez important pour que cette étude soit menée avec pertinence. La poursuite des observations des glissements de terrain permettrait donc d'améliorer les connaissances acquises jusqu'à présent.

De plus, l'ensemble des conclusions établies jusqu'à maintenant sont à confirmer par la poursuite du projet de recherche, les observations (pluviométrie et déplacements) n'ayant pas été menées sur une période suffisamment longue.

4.3. UTILISATION DU LOGICIEL TEMPO

4.3.1. Présentation du logiciel Tempo

Le logiciel Tempo a été développé en interne par le BRGM (Manuel d'utilisation : JL Pinault, 2001, Rapport BRGM/RP-51459-FR). Il est destiné au traitement et à la modélisation de séries temporelles principalement dans les domaines de l'hydrogéologie et de l'hydrogéochimie. Il est le fruit d'un savoir faire dans le domaine du traitement du signal ainsi que des techniques d'inversion et de régularisation utilisées dans différentes disciplines. De par sa conception, Tempo est un logiciel polyvalent et peut être appliqué à des données très diverses.

Les traitements peuvent conduire à la caractérisation du fonctionnement d'un système, à la modélisation inverse des phénomènes ou bien à leur simulation. Le terme de modélisation inverse recouvre ici les techniques visant à reproduire le signal de sortie (le débit d'eau par exemple ou la vitesse de déplacement dans notre cas) à partir d'une chronique de pluie.

Contrairement à la modélisation directe qui consiste à reproduire le comportement d'un système à partir de concepts reposant à la fois sur la description de ce système et l'application de lois physiques, la modélisation inverse déduit le fonctionnement du système de l'analyse des données.

La relation causale entre le signal d'entrée et le signal de sortie est matérialisée par une fonction de transfert (ou réponse impulsionnelle).

Le logiciel Tempo travaille uniquement avec des séries temporelles impulsionnelles. Dans la suite de l'étude, ce sont donc les vitesses de déplacement (série impulsionnelle) qui ont été considérées et non plus les déplacements eux-mêmes (série non impulsionnelle).

Le signal d'entrée correspond à la pluviométrie et le signal de sortie à la vitesse de déplacement.

La période Septembre 2006 - Mai 2007 dépourvue de données de déplacement a été *volontairement écartée de l'analyse pour ne pas forcer le modèle à des hypothèses non* confirmées.

4.3.2. Modélisation réalisée grâce à Tempo.

a) Glissement de Grand Ilet

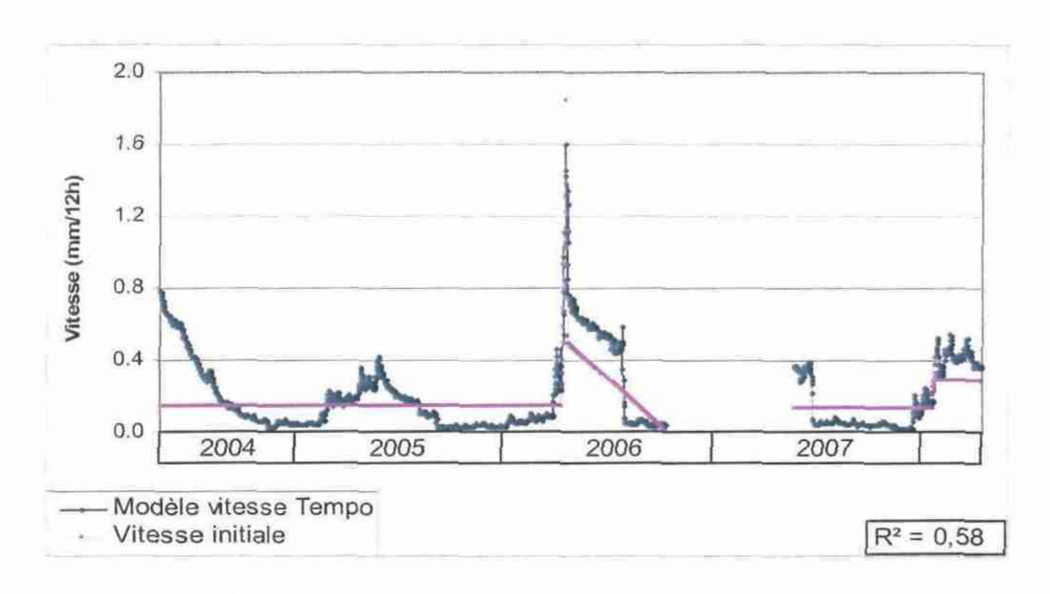


Illustration 39 : Grand Ilet : modèle sous Tempo

Le coefficient R^2 est un paramètre caractérisant la qualité de l'ajustement. L'ajustement du modèle est d'autant meilleur que R^2 est proche de 1.

La fonction de transfert associée au glissement de Grand Ilet ne possède pas un coefficient d'ajustement très bon ($R^2 = 0,58$). Tempo reproduit des pics de pluie qui n'existent pas ou, dans une autre mesure, que la dispersion des points de positionnement initiaux ne permet pas de visualiser.

Les prévisions réalisées avec cette fonction de transfert seront donc à utiliser avec précaution.

Le modèle sert alors à recréer les vitesses (et implicitement les déplacements) associées à une nouvelle série de pluie.

En reprenant la série de pluie entre 2004 et 2008, le logiciel Tempo permet ainsi de reconstituer le déplacement dû au passage du cyclone Gamède sur l'île (période de lacune des GPS : Septembre 2006-Mai 2007).

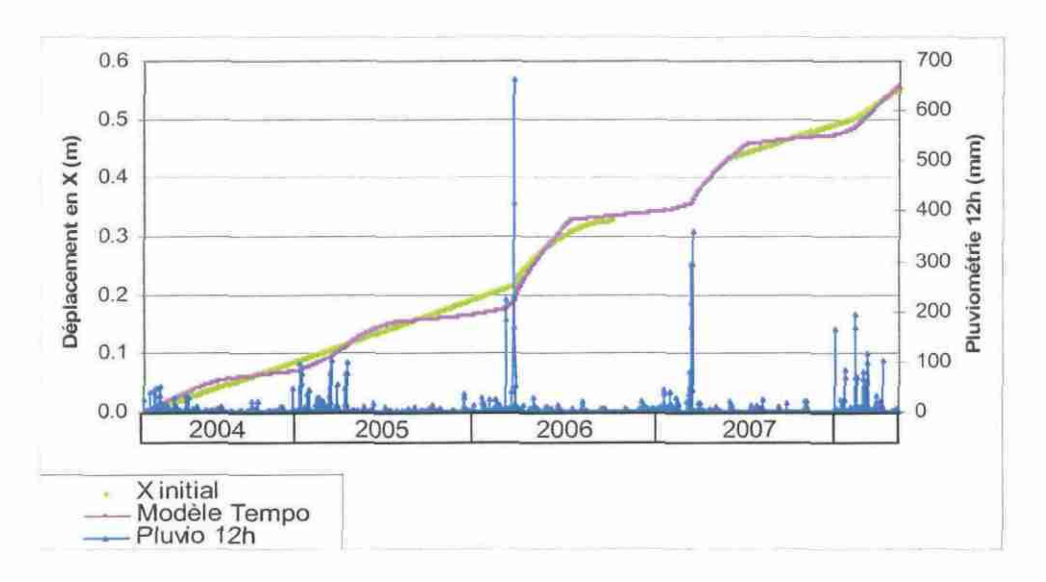


Illustration 40 : Grand Ilet : reconstitution des déplacements grâce à Tempo

Le graphique met en évidence la qualité du modèle : l'ajustement du modèle n'est pas parfait mais l'allure générale de la courbe de déplacement est respectée. Pour chaque période pluvieuse, Tempo reproduit des accélérations du mouvement qui n'existent pas ou, dans une autre mesure, que la dispersion des points de positionnement ne permet pas de visualiser. De plus, le raccordement entre les 2 courbes après la période de lacune permet d'affirmer que le modèle a relativement bien réussi à reproduire l'accélération du mouvement due au passage du cyclone Gamède en 2007.

Les paramètres de calage utilisés par Tempo sont les suivants :

- réponse rapide : 10 jours ;
- réponse lente : 90 jours.

Ces paramètres sont très utilisés en hydrologie et en hydrogéologie dans la simulation du phénomène crue-décrue mais pour cette étude, ils ne représentent rien physiquement.

b) Glissement de Hell-Bourg

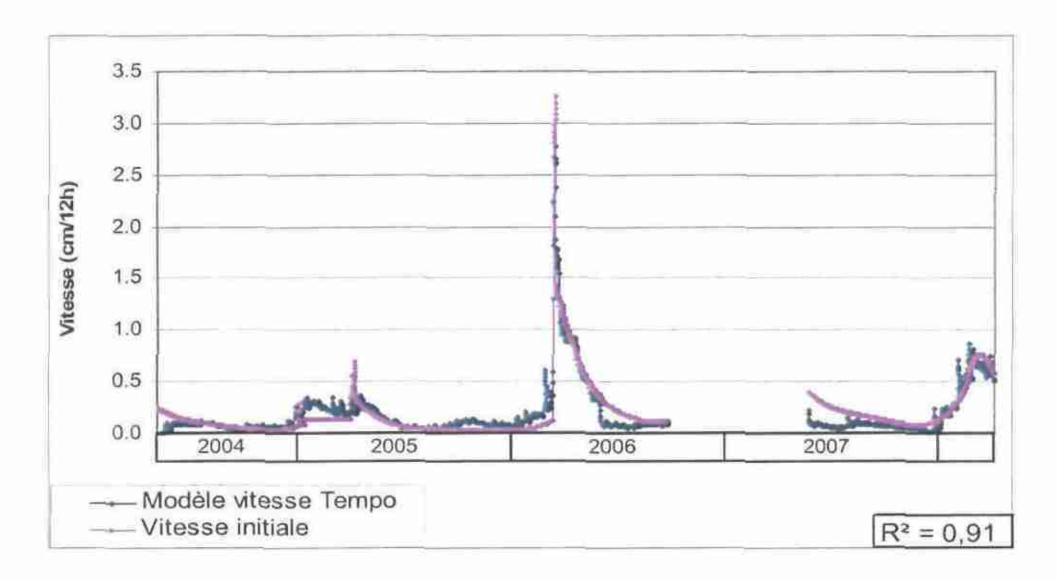


Illustration 41 : Hell-Bourg : modèle sous Tempo

Le coefficient d'ajustement associé à la fonction de transfert du glissement de Hell-Bourg est proche de 1 (R^2 = 0,91) : la courbe du modèle Tempo s'ajuste très bien avec la courbe des vitesses initiales. Cette fonction de transfert va donc permettre de réaliser des prévisions correctes par rapport aux données d'observation.

Comme pour le glissement de Grand Ilet, le modèle sert alors à recréer les vitesses (et implicitement les déplacements) associées à une nouvelle série de pluie.

En reprenant la série de pluie entre 2004 et 2008, le logiciel Tempo permet ainsi de reconstituer le déplacement du au passage du cyclone Gamède sur l'île (période de lacune des GPS : Septembre 2006-Mai 2007).

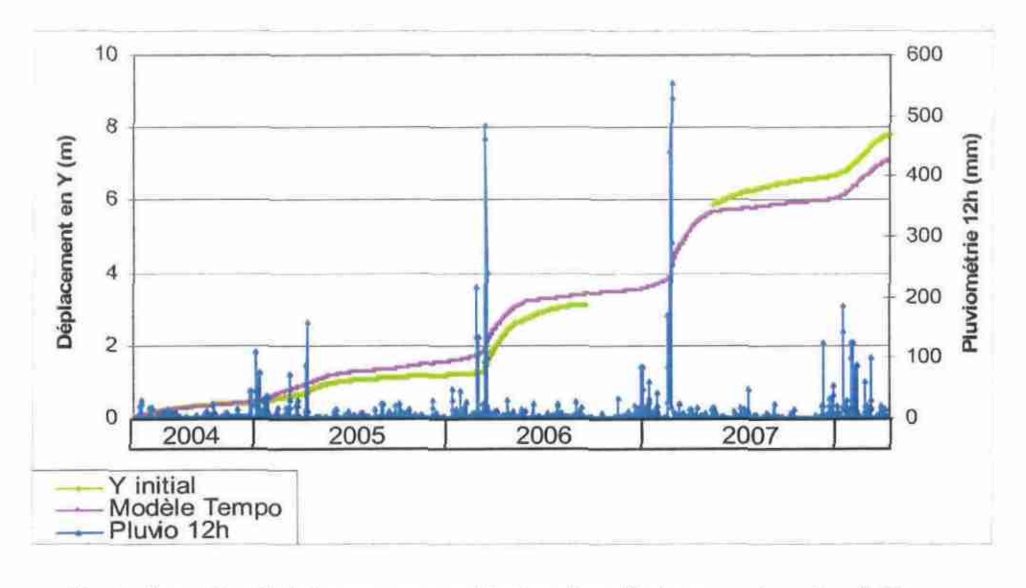


Illustration 42 : Hell-Bourg : reconstitution des déplacements grâce à Tempo

Le graphique met en évidence la qualité du modèle Tempo : l'ajustement du modèle n'est pas parfait mais l'allure générale de la courbe de déplacement est respectée. Pendant les années 2004, 2005 et 2006, Tempo reproduit les accélérations du mouvement en les surestimant (quelques dizaines de cm). Après la période de lacune, les mouvements reconstitués par Tempo sont au contraire sous-estimés. Le logiciel a donc sous estimé le déplacement associé au passage du cyclone Gamède.

Les paramètres de calage utilisés par Tempo sont les mêmes que pour le glissement de Grand Ilet (réponse rapide : 10 jours ; réponse lente : 90 jours) mais ils ne représentent rien physiquement.

4.3.3. Différents scénarii envisagés

La fonction de transfert déterminée par Tempo permet alors d'établir plusieurs scénarii d'évolution possible des glissements en fonction des hypothèses de précipitations retenues (reconstitution « simulée » de courbes d'évolution de vitesses et de déplacements). De façon à avoir une plage d'observation plus large et intégrant notamment un nombre d'événements pluvieux à caractère exceptionnel plus significatif, les pluviométries enregistrées depuis fin 2003 ont été complétées par des données pluviométriques depuis 2001 issues de poste pluviométriques proches des deux sites pilotes :

- la pluviométrie de Mare à Vieille Place pour le glissement de Grand Ilet ;

- la pluviométrie de Hell-Bourg pour le glissement de Hell-Bourg.

A partir de ces données, différents scénarii de pluviométrie ont été envisagés. Les météorologues s'accordent pour affirmer qu'avec l'évolution future du climat, les dépressions cycloniques à venir seront soit plus nombreuses, soit d'intensité plus élevée.

Les scénarii considérés sont donc les suivants :

- répétition à l'identique de la séquence pluviométrique 2002/2008 sur la période 2009/2015 ;
- répétition de la séquence pluviométrique 2002/2008 sur la période 2009/2015, avec majoration selon un coefficient 1,5 des événements cycloniques ;
- génération d'un épisode cyclonique par saison des pluies (succession de la séquence Dina/Diwa/Gaméde sans coefficient majorateur) sur la période 2002-2015.

A partir de ces scénarii, le logiciel Tempo calcule les vitesses associées et les courbes de déplacement sont reconstituées. Dans un deuxième temps, afin de pouvoir interpréter la relation pluie/déplacement, le cumul de pluie pour chaque saison pluvieuse (15 Novembre-30 Avril) a été mis en relation avec le déplacement associé.

4.3.4. Résultats pour le glissement de Grand Ilet

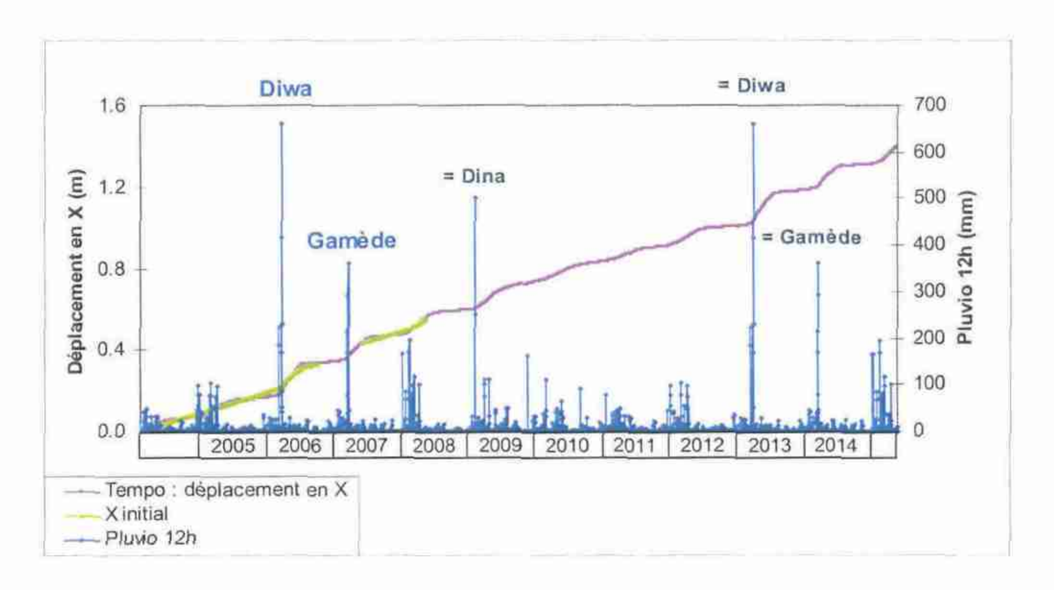


Illustration 43 :Simulation Tempo : Grand Ilet-répétition des saisons des pluies

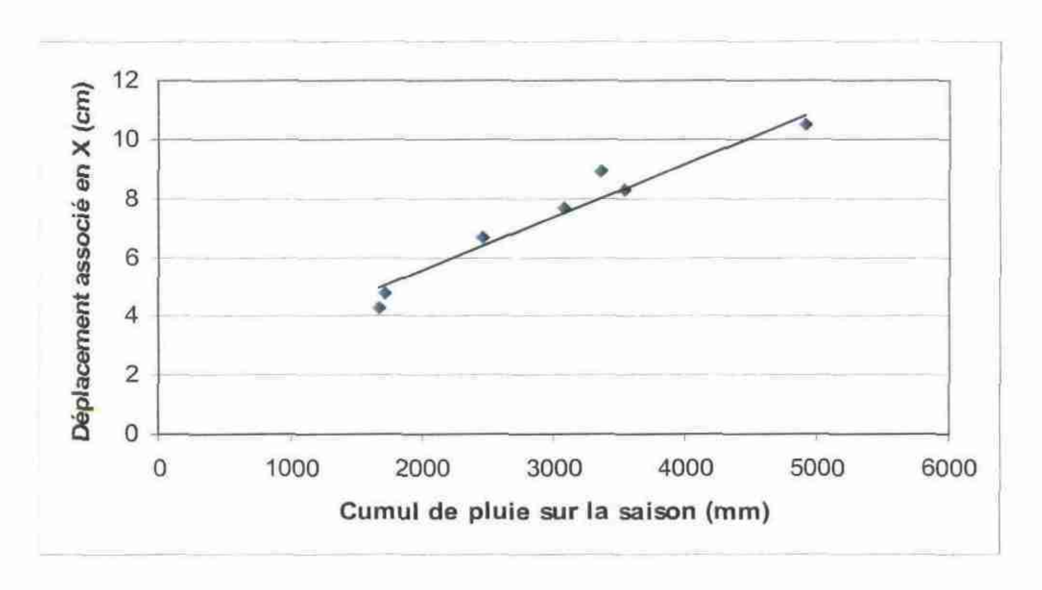


Illustration 44 : Grand Ilet-répétition des saisons de pluie : relation pluie/déplacement

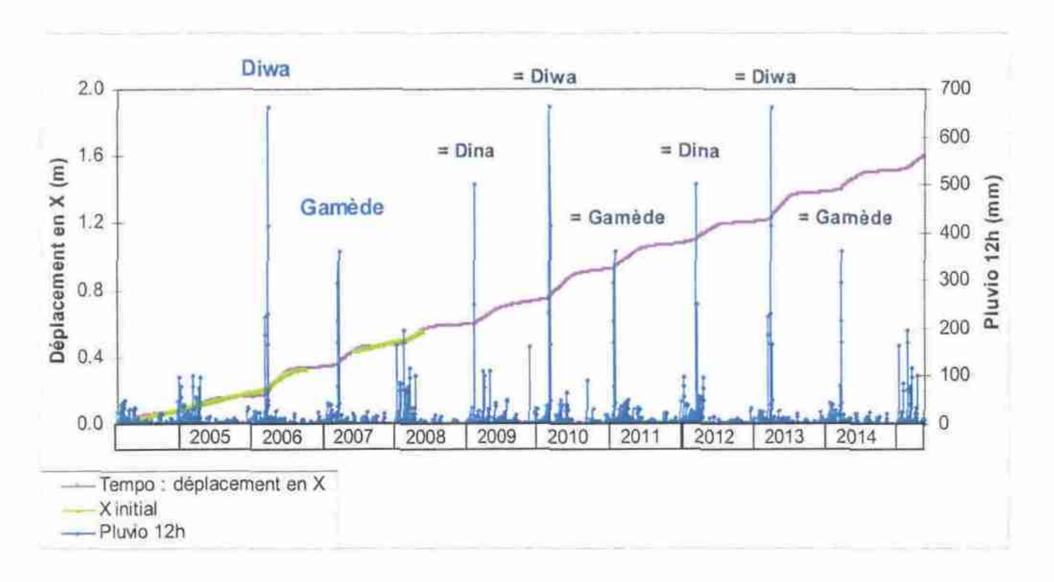


Illustration 45 : Simulation Tempo : Grand Ilet-augmentation du nombre de cyclones

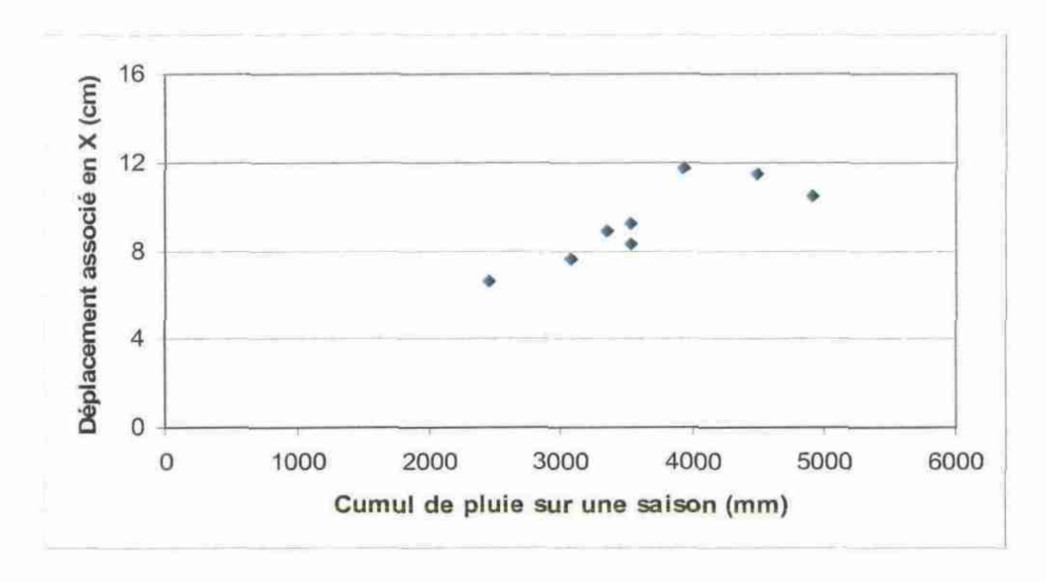


Illustration 46 : Grand Ilet-augmentation du nombre de cyclones : relation pluie/déplacement

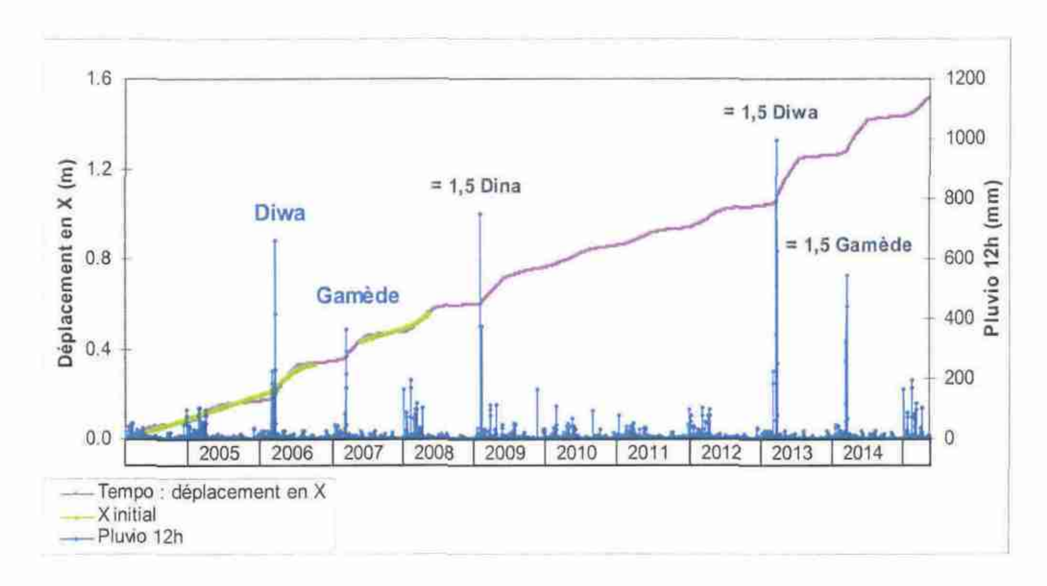


Illustration 47 : Simulation Tempo : Grand Ilet-augmentation de l'intensité des cyclones

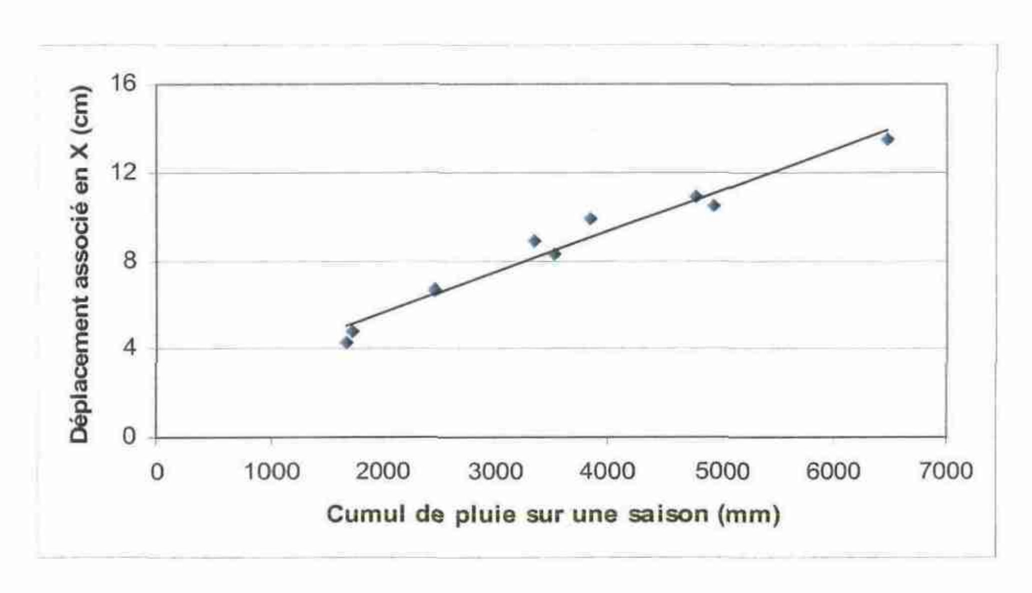


Illustration 48 : Grand Ilet-augmentation de l'intensité des cyclones : relation pluie/déplacement

Dans le cas de Grand Ilet, il semble qu'il existe une relation de linéarité entre le cumul de pluie durant une saison des pluies et le déplacement planimétrique associé à cette période même si la dispersion des points pour la simulation sur l'augmentation du nombre de cyclones ne permet pas de distinguer une quelconque relation.

La dernière simulation a été répétée en multipliant successivement les intensités des cyclones par : 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75 et 2.

Par la suite, afin d'étudier le comportement du glissement de terrain sur un unique événement de pluie, seuls les résultats de l'année 2013 sont interprétés (année où l'intensité du cyclone Diwa varie). Afin de visualiser le comportement du glissement, le cumul de pluie a été mis en relation avec le déplacement associé :

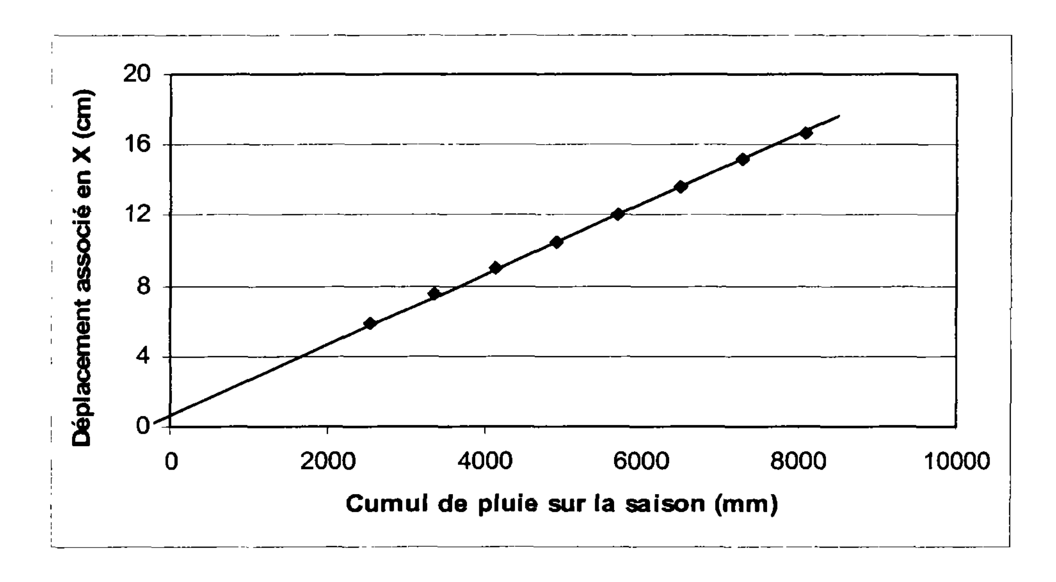


Illustration 49 : Grand Ilet : variation de l'intensité des cyclones : relation pluie/déplacement

En considérant la même saison des pluies mais en faisant varier l'intensité de l'épisode cyclonique Diwa, le modèle Tempo met également en évidence une relation de linéarité entre le cumul de pluie et le déplacement planimétrique associé.

4.3.5. Résultats pour le glissement de Hell-Bourg

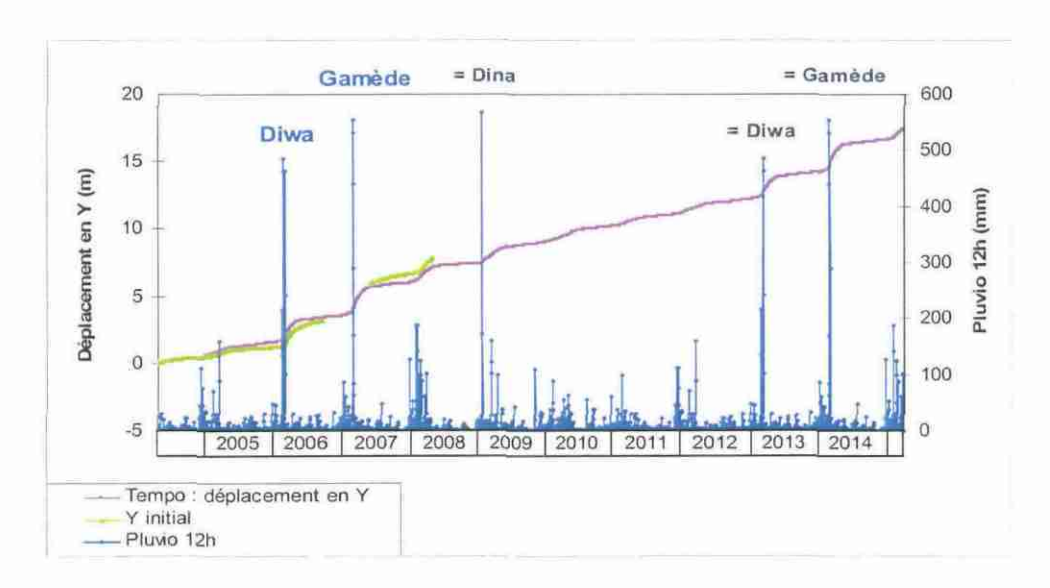


Illustration 50 : Simulation Tempo : Hell-Bourg-répétition des saisons des pluies

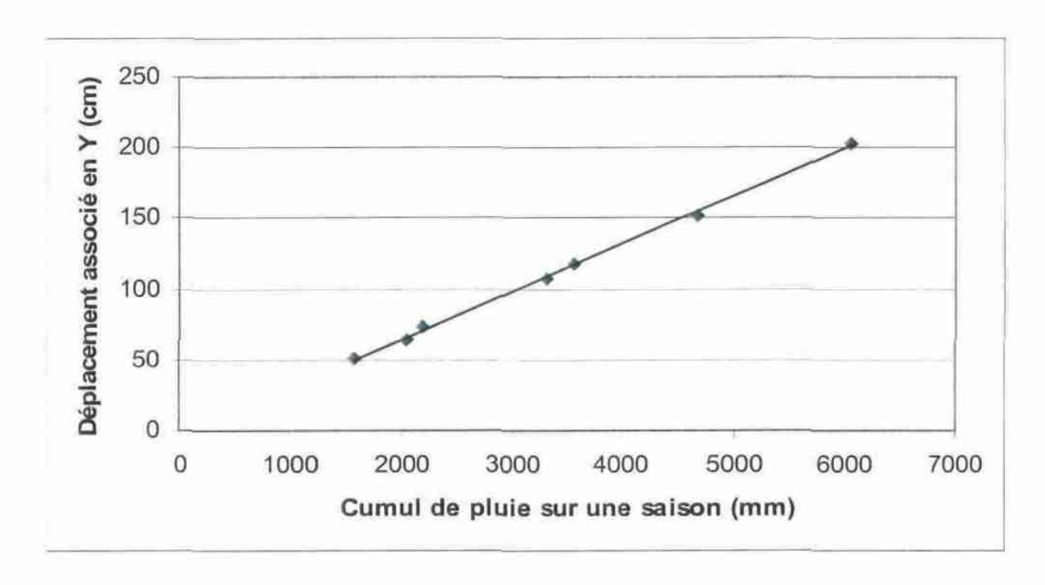


Illustration 51 : Hell-Bourg-répétition des saisons de pluie : relation pluie/déplacement

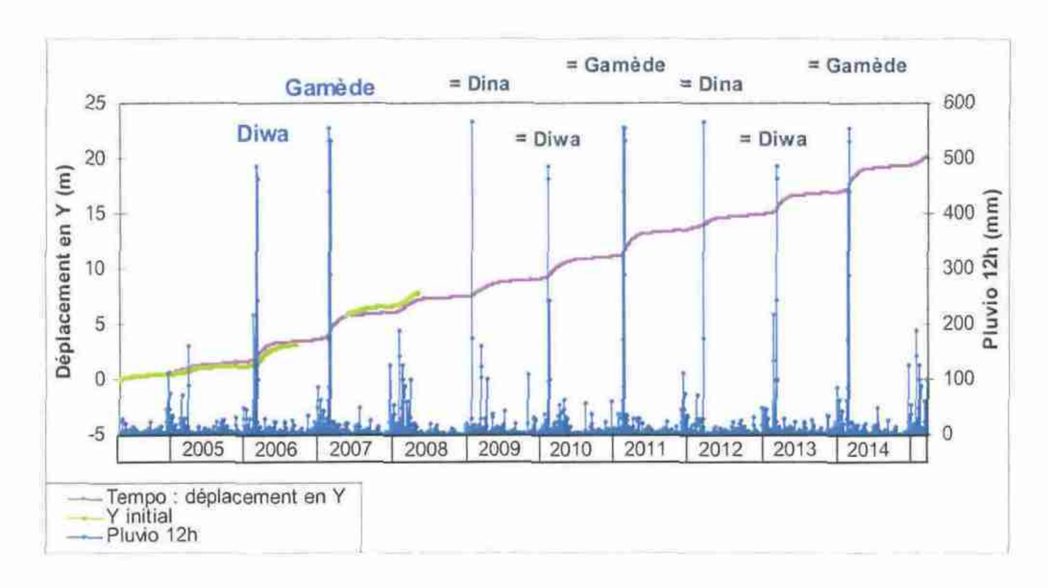


Illustration 52 : Simulation Tempo : Hell-Bourg-augmentation du nombre de cyclones

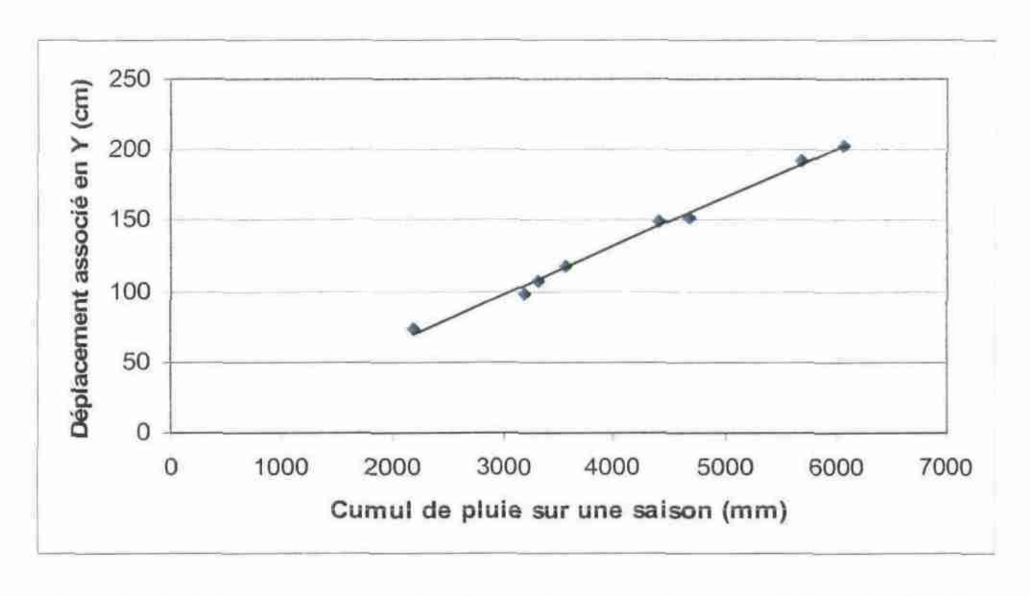


Illustration 53 : Hell-Bourg-augmentation du nombre de cyclones : relation pluie/déplacement

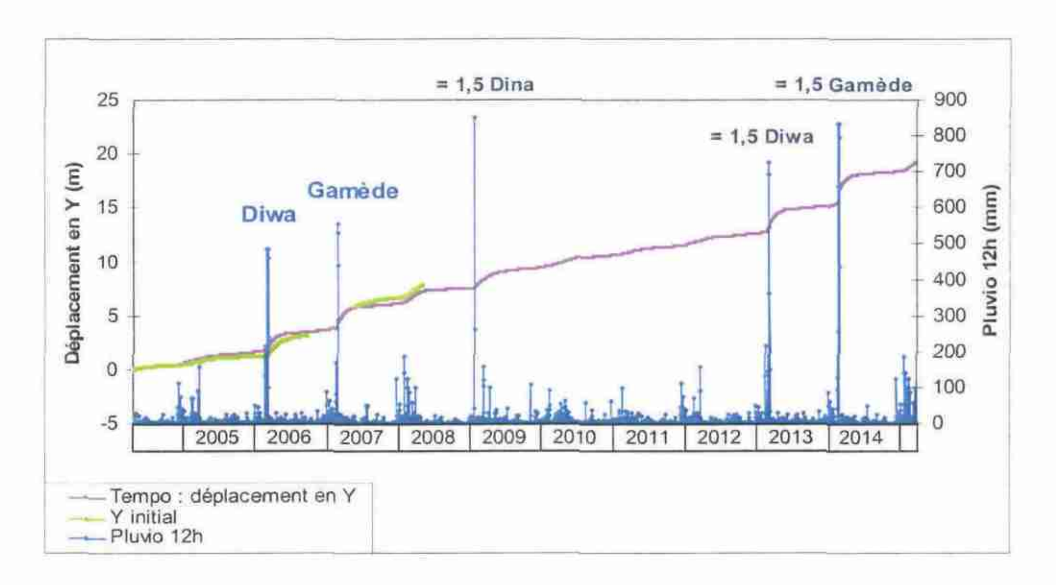


Illustration 54 : Simulation Tempo : Hell-Bourg-augmentation de l'intensité des cyclones

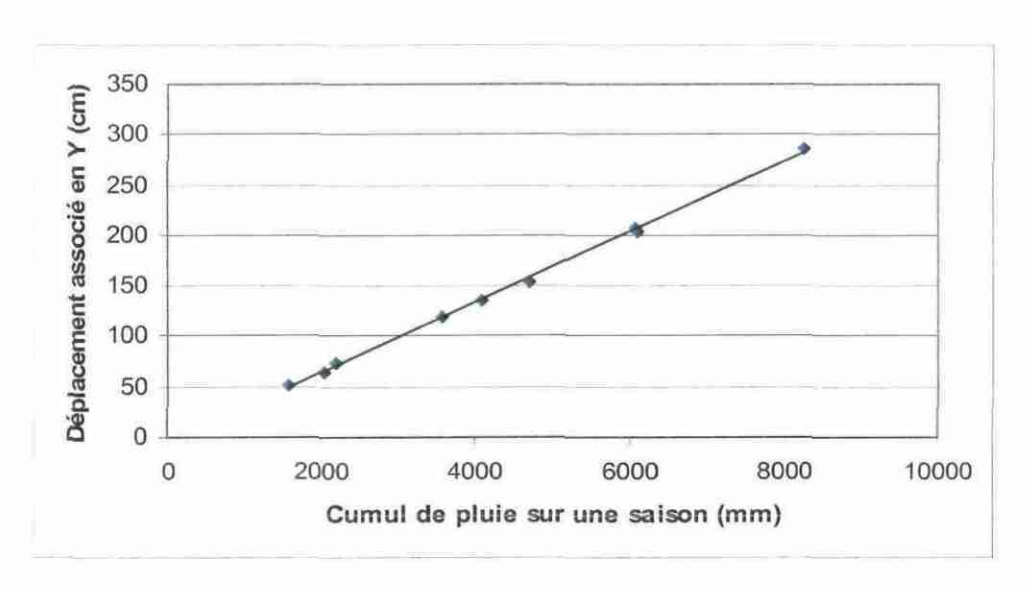


Illustration 55 : Hell-Bourg-augmentation de l'intensité des cyclones : relation pluie/déplacement

Dans le cas de Hell-Bourg, il semble qu'il existe une relation de linéarité entre le cumul de pluie durant une saison des pluies et le déplacement planimétrique associé à cette période. Les points sont presque alignés parfaitement pour l'ensemble des simulations réalisées.

Comme pour le glissement de Grand Ilet, la dernière simulation a été répétée en multipliant successivement les intensités des cyclones par : 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75 et 2.

Par la suite, afin d'étudier le comportement du glissement de terrain sur un unique événement de pluie, seuls les résultats de l'année 2014 sont interprétés (année où l'intensité du cyclone Gamède varie). Afin de visualiser le comportement du glissement, le cumul de pluie a été mis en relation avec le déplacement associé :

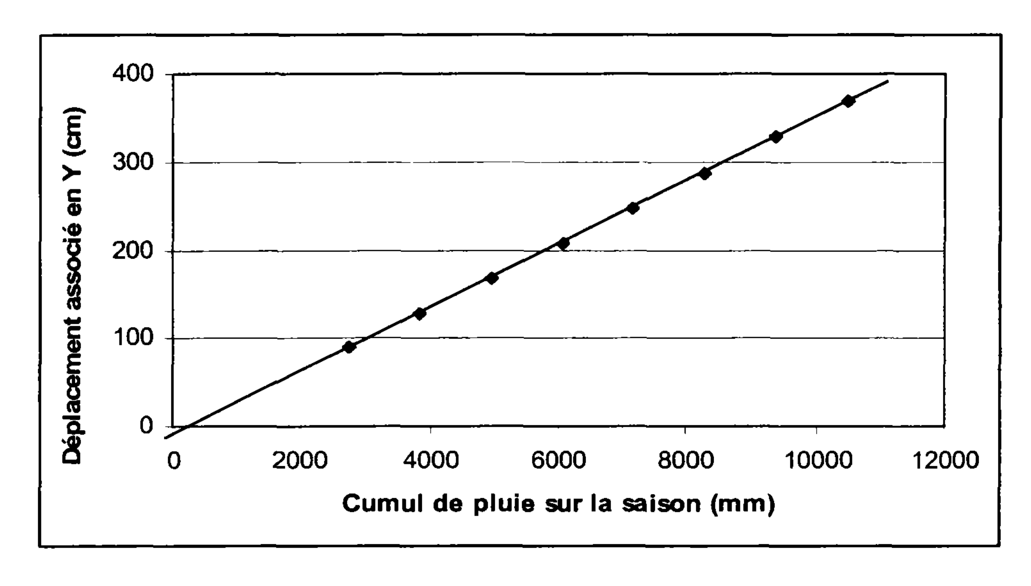


Illustration 56 : Hell-Bourg : variation de l'intensité des cyclones : relation pluie/déplacement

Comme pour le glissement de Grand Ilet, en considérant la même saison des pluies mais en faisant varier l'intensité de l'épisode cyclonique Gamède, le modèle Tempo met aussi en évidence une relation de linéarité entre le cumul de pluie et le déplacement planimétrique associé.

4.3.6. Bilan et interprétation

L'ensemble des graphiques issus des différentes modélisations sous Tempo tendent à conforter l'hypothèse de l'existence d'une relation linéaire entre la pluviométrie et les mouvements. Quelque soit en effet le scénario considéré, l'occurrence d'un épisode pluvieux important se traduit par une accélération et des déplacements plus ou moins marqués, avant un amortissement qui semble intervenir de façon relativement analogue, tant en terme de délai après la fin de l'épisode pluvieux que de rapidité du retour à la normale.

On prendra ainsi pour exemple les scénarii 1 et 2, avec les épisodes simulés Diwa et Gamède (années 2013 et 2014) : les déplacements apparaissent proportionnels à l'intensité du cyclone (ici rapportée à l'importance des cumuls pluviométriques) puisqu'on retrouve également le coefficient 1,5 entre les valeurs de déplacement obtenus pour les deux scénarii. L'amortissement s'effectue sensiblement dans les mêmes conditions et on n'observe pas, dans le cas du scénario 2, d'amortissement en sortie d'épisode pluvieux à un palier de vitesses de déplacement qui soit significativement supérieure à celui du scénario 1.

L'ampleur des déplacements apparaît ainsi directement proportionnelle à la quantité de pluies tombées sur la zone glissée, soit résultant d'un événement isolé soit d'une accumulation d'épisodes pluvieux d'intensité plus modeste.

Le scénario 3 souligne quant-à-lui que la succession à un rythme soutenu d'événements pluvieux exceptionnels (un épisode cyclonique par saison des pluies) ne semble pas entrainer de phénomène de fragilisation de la masse en mouvement. On n'observe pas en effet d'accélération générale du glissement :

- pas d'amortissement en sortie de crise avec stabilisation à un palier de vitesse supérieure à celui existant avant l'événement ;

- maintien dans la durée (malgré la succession des épisodes pluvieux) d'une relation pluies/déplacements pseudo-linéaire. La courbe des déplacements sur la période 2008/2015 ne montre pas de franche incurvation traduisant un « emballement » du glissement en réponse à une « sollicitation cyclonique » importante.

Dans cette étude, il est important d'insister sur le fait que les données issues du logiciel Tempo ne doivent être considérées que comme des indications qu'il convient d'analyser avec précaution, leur fiabilité étant entachées notamment par la dispersion des valeurs de positionnement. En outre, la pertinence de la fonction de transfert définie est alterée par la discontinuité des données GPS acquises, qui ne permet pas notamment d'exploiter pleinement le passage de Gamède. Ainsi, le nombre d'événement pluvieux à caractère exceptionnel "disponibles" (pluviométrie + déplacements) se limite à Diwa (pas d'épisode cyclonique lors de la saison 2007-2008).

De plus, le logiciel montre une limite importante à son utilisation : il construit ses modèles sur les données observées et connues et ne peut donc pas "deviner" le comportement des glissements face à des scénarii de pluie qu'il ne connait pas.

En conséquence, les précédents enseignements notamment sur la linéarité de la relation pluies/déplacements devront être confrontés aux données issues d'une plage d'observation plus importante, ce qui sous-entend la poursuite du programme d'acquisition.

4.4. REMARQUE

Les habitants et les élus du cirque de Salazie témoignent d'un sentiment d'accélération des mouvements depuis l'année 2002. Afin de comprendre cette accélération, la pluviométrie du site de Mare à Vieille Place a été étudiée depuis l'année 1995.

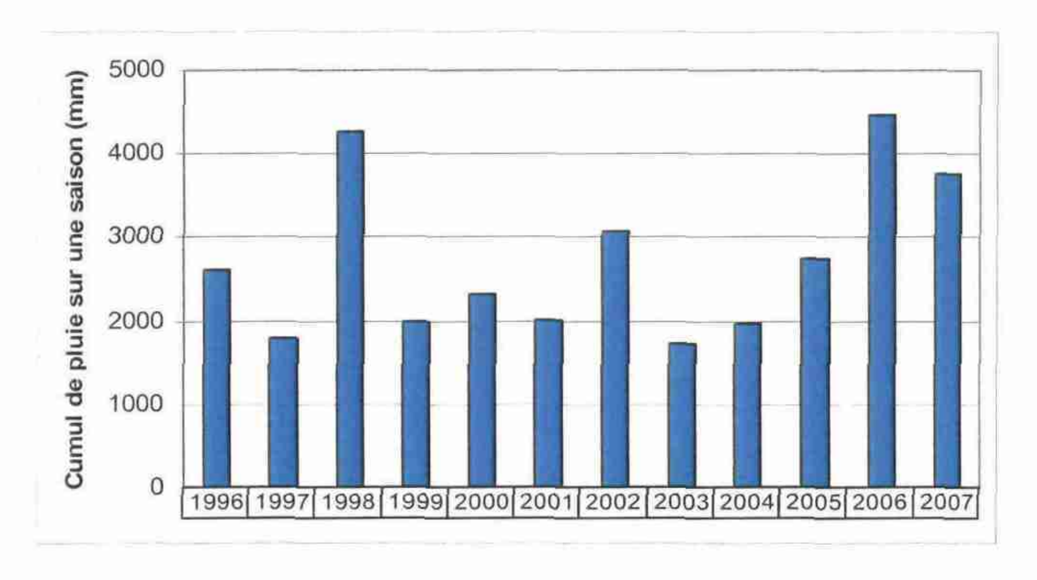


Illustration 57 : Cumuls de pluie sur une saison, poste de Mare à Vieille Place, 1996-2007

Les cumuls de pluie sur les saisons pluvieuses (15 Novembre-30 Avril) montrent qu'il s'est produit en effet moins d'événements pluvieux importants pendant la période 1996-2001 (Anacelle en 1998) que pendant la période 2002-2007 (Dina en 2002, Diwa en 2006 et Gamède en 2007). Une simulation sur Tempo avec le modèle du glissement de Hell-Bourg par exemple permet de comparer les vitesses de déplacement.

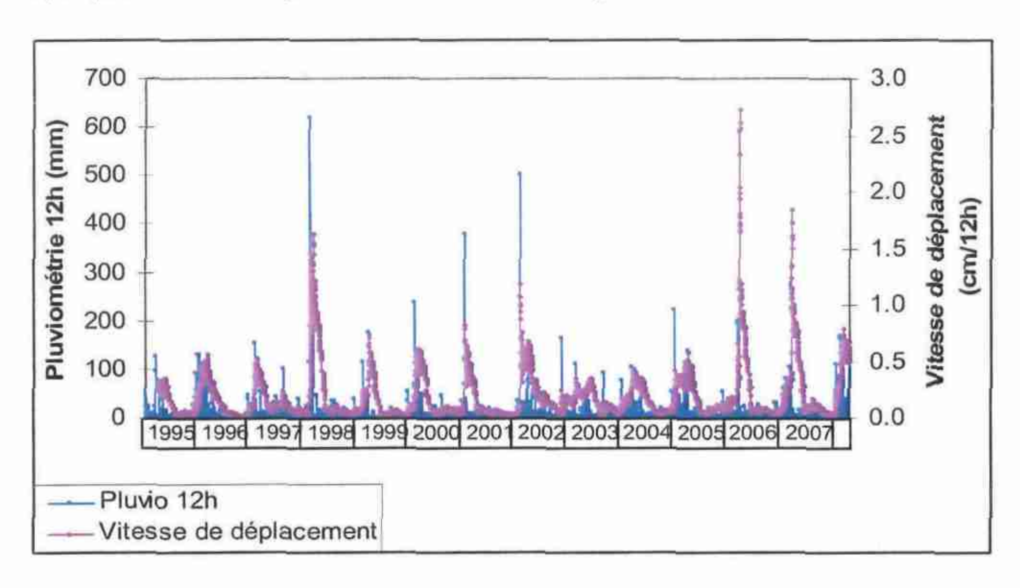


Illustration 58 : Tempo : pluvio Mare à Vieille Place, 1995-2008

D'après le graphique issu de la simulation sous Tempo, la vitesse de déplacement moyenne entre le 10 Avril 1995 et le 31 Décembre 2001 est de l'ordre de 0,15 cm/12h soit 107 cm/an et la vitesse de déplacement moyenne entre le 1 Janvier 2002 et le 31 Mars 2008 est de l'ordre de 0,20 cm/12h soit 150 cm/an. La vitesse de déplacement depuis ces 6 dernières années est en effet plus élevée par rapport à la période 1995-2001.

L'augmentation du nombre d'événements pluvieux importants au fil du temps a donc engendré une accélération du mouvement assez conséquente.

5. Conclusion

Le suivi des glissements de terrain de Grand Ilet et de Hell-Bourg à l'aide de stations GPS permanente a permis d'appréhender leurs évolutions spatiales ainsi que leurs vitesses de déplacement.

L'analyse combinée de la pluviométrie et des déplacements a montré qu'il existe une relation directe pluies/déplacements, qui s'explique probablement par un phénomène de mise en pression de la(des) surface(s) de cisaillement par les eaux d'infiltration rejoignant le corps des glissements.

La persistance d'un déplacement minimum en période sèche alors que les sources sont à l'étiage, montre que les masses instables ont une capacité à glisser purement gravitairement. La résistance au cisaillement résiduelle des surfaces de glissement, acquise en grands déplacements, ne suffit plus à contenir la masse glissée. La pluviométrie joue donc le rôle d'accélérateur des mouvements, et n'a donc pas un effet déclencheur.

La réactivité rapide du système pluies/déplacements tend à démontrer que la part d'infiltration vers les plans de glissement est très importante. Elle pourrait ainsi s'expliquer par le fait que ces infiltrations se font prioritairement, et de façon assez directe, par le biais d'un réseau de fissures émergeant en surface et sont entretenues, dans un second temps, par les infiltrations directes à travers le matériel brèchique constituant les corps des deux glissements de terrain. Ce schéma permettrait d'expliquer le faible temps de réaction du glissement après le pic pluvieux et le fait que les mouvements ne s'amortissent que lentement après la fin des pluies.

L'analyse combinée de la pluviométrie et des déplacements réalisée à partir du logiciel Tempo développé en interne par le BRGM, tend à mettre en lumière le fait que la relation directe entre ces deux paramètres est linéaire. Les simulations indiquent notamment :

- que les déplacements sont directement proportionnels à la quantité d'eau tombée au cours de la saison humide (et donc en mesure de s'infiltrer dans la zone en mouvement) ;
- que l'occurrence de saisons cycloniques très arrosées ne génère pas « d'emballement » du glissement, ce qui laisse supposer que les matériaux glissés conservent une certaine résistance au cisaillement ;
- qu'il est nécessaire de dépasser un cumul pluviométrique sur la saison pour que les mouvements connaissent une accélération significative.

L'analyse combinée des enregistrements géodésiques et de la pluviométrie ont permis de progresser significativement dans la connaissance du fonctionnement du glissement, et notamment sur la relation pluies/déplacements. Ces enseignements doivent cependant être pris avec beaucoup de précaution, dans la mesure notamment où la plage d'enregistrement pluies/déplacements est relativement limitée et le nombre d'épisodes pluvieux exceptionnels exploitables peut être jugé insuffisant. Ces avancées dans la connaissance sur la relation pluies/déplacements devront par conséquent être confortées par la poursuite du travail d'acquisition et d'interprétation.

La poursuite des observations dans les années à venir permettrait donc de :

- confirmer l'évolution spatiale des glissements de terrain ;
- affiner la recherche de la relation entre la pluviométrie et le déplacement ;
- mieux appréhender les phases d'accélération après les épisodes pluvieux.

Dans ce cadre, l'instrumentation des sites pilotes pourrait être améliorée. Par exemple :

- une ou plusieurs stations GPS permanentes pourraient être mises en place à l'extrémité du plateau de Grand Ilet, là où les bornes MVTerre montrent que le déplacement est le plus important. Cela limiterait le phénomène dominant du bruit de fond ;

- il sera judicieux de réfléchir à l'emplacement optimal de nouveaux pluviomètres par rapport à l'emplacement de nouvelles stations GPS permanentes ou des stations GPS permanentes existantes.

Bibliographie

M. Cruchet, Auber B. (2003) – Suivi des glissements de Hell-Bourg et de Grand-Ilet. Présentation des dispositifs de mesure. **Rapport BRGM/RP-52938-FR**, 22 p., 5 fig., 4 tab., 4 ann.

Cabinet Talibart (2007) - Compte rendu des missions effectuées sur les cirques de Salazie, Cilaos et Mafate pour la période du 11 septembre au 10 octobre 2007.

Cabinet Talibart (2008) - Compte rendu de la mission de Mars 2008 effectuée dans le cirque de Salazie.

M. Soler (1997) – Météo France – Atlas climatique de la Réunion. Bureau d'étude climatologique (direction interrégionale de la Réunion).

JL Pinault (2001) - Manuel d'utilisation du logiciel Tempo (2001). **Rapport BRGM/RP-51459-FR**

Stollsteiner Ph. - collab. Aunay B. (2008) – Etude hydrogéomorphologique de la Rivière du Mât et propositions de solutions de gestion. **Rapport BRGM RP-56364-FR** ; 72 p.



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Réunion
5, Rue Sainte-Anne
BP 906
97478 Saint-Denis – Réunion – France
Tél. : 02.62.21.22.14